



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - EE 184801

DESAIN DAN SIMULASI KONTROL KECEPATAN MOTOR
DC *BRUSHLESS* UNTUK SEPEDA MOTOR LISTRIK
BERBASIS ANFIS (*ADAPTIVE NEURO FUZZY
INFERENCE SYSTEM*)

Danis Rizky Pratomo
NRP 07111540000014

Dosen Pembimbing
Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.
Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - EE 184801

**DESAIN DAN SIMULASI KONTROL KECEPATAN MOTOR
DC *BRUSHLESS* UNTUK SEPEDA MOTOR LISTRIK
BERBASIS ANFIS (*ADAPTIVE NEURO FUZZY
INFERENCE SYSTEM*)**

Danis Rizky Pratomo
NRP 07111540000014

Dosen Pembimbing
Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.
Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - EE 184801

**DESIGN AND SIMULATION SPEED CONTROL OF
BRUSHLESS DC MOTOR FOR ELECTRIC MOTOCYCLE
BASED ON ANFIS (ADAPTIVE NEURO FUZZY
INFERENCE SYSTEM)**

Danis Rizky Pratomo
NRP 07111540000014

Supervisors
Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D
Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa seluruh isi pada tugas akhir ini dengan judul “**DESAIN DAN SIMULASI KONTROL KECEPATAN MOTOR DC *BRUSHLESS* UNTUK SEPEDA MOTOR LISTRIK BERBASIS ANFIS (*ADAPTIVE NEURO FUZZY INFERENCE SYSTEM*)**” adalah merupakan hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan sumber materi yang tidak diizinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Januari 2019



Danis Rizky Pratomo
07111540000014

--- halaman ini sengaja dikosongkan ---

**DESAIN DAN SIMULASI KONTROL KECEPATAN MOTOR DC
BRUSHLESS UNTUK SEPEDA MOTOR LISTRIK BERBASIS
ANFIS (ADAPTIVE NEURO FUZZY INFERENCE SYSTEM)**


TUGAS AKHIR


**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II


Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D
NIP. 198006032006041003


Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.
NIP. 195512071980031004

**SURABAYA
JANUARI, 2019**

DESAIN DAN SIMULASI KONTROL KECEPATAN MOTOR DC BRUSHLESS UNTUK SEPEDA MOTOR LISTRIK BERBASIS ANFIS (ADAPTIVE NEURO FUZZY INFERENCE SYSTEM)

Nama : Danis Rizky Pratomo
Dosen Pembimbing I : Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D
Doaen Pembimbin II : Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

ABSTRAK

Harga minyak sebagai bahan bakar kendaraan pada era sekarang ini adalah tidak stabil dan cenderung mengalami kenaikan. Selain itu desain dari kendaraan bermotor konvensional yang tidak ramah lingkungan dan memiliki efisiensi yang jelek semakin memperkuat penyebab untuk beralih menggunakan kendaraan listrik. Institut Teknologi Sepuluh Nopember turut ambil alih dalam pengembangan kendaraan listrik dengan produknya yaitu GESITS yang merupakan sepeda motor listrik. Motor yang digunakan pada GESITS adalah motor BLDC. Untuk memaksimalkan kinerja motor BLDC dibutuhkan kontrol kecepatan yang baik. Salah satu jenis metode kontrol kecepatan pada motor BLDC adalah metode kontrol tegangan dengan menggunakan metode PWM. Pada tugas akhir ini akan didesain sistem kontrol kecepatan dengan metode PWM berbasis kontroler ANFIS dengan supervisi *Fuzzy*-PID. *Training data* yang didapatkan dari kontroler *Fuzzy*-PID akan dimodifikasi kemudian digunakan sebagai acuan dalam pelatihan FIS menggunakan algoritma ANFIS.

Dari simulasi didapatkan pada saat kecepatan referensi tetap 1000 rpm dan beban tetap 5 N.m kontroler ANFIS mempunyai *rise time* 0,27 detik dan *steady state error* 0,08%. Sementara PID dan *Fuzzy*-PID dengan *rise time* 0,48 detik dan 0,39 detik serta *steady state error* 0,58 % dan 0,1 %. Pada saat beban berubah dan kecepatan referensi tetap kontroler ANFIS cenderung mengalami perubahan kecepatan yang kecil dibanding PID dan *Fuzzy*-PID. Kemudian pada saat kecepatan referensi bervariasi dan beban tetap, kontroler ANFIS memiliki nilai rata-rata *steady state error* yang paling kecil. Oleh karena itu dapat disimpulkan kontroler ANFIS memiliki respon kecepatan yang lebih baik dibanding dengan PID dan *Fuzzy*-PID.

Kata kunci : Motor BLDC, Kontroler, ANFIS, PID, *Fuzzy*-PID, PWM.

--- halaman ini sengaja dikosongkan ---

DESIGN AND SIMULATION SPEED CONTROL OF BRUSHLESS DC MOTOR FOR ELECTRIC MOTOCYCLE BASED ON ANFIS (ADAPTIVE NEURO FUZZY INFERENCE SYSTEM)

Name : Danis Rizky Pratomo
Supervisor I : Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D
Supervisor I : Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

ABSTRACT

The cost of fuel for conventional motorized vehicle in this era is not stable and tends to increase. Furthermore the design of conventional motorized vehicle that not fully eco friendly and has poor efficiency strengthen the reason to use electric vehicle. “Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)” take part in developing electric vehicle by their electric motorcycle named GESITS. The type of motor that used by their product is BLDC motor. Good speed control needed for maximizing the performance of BLDC motor. One of the speed control method is voltage control with PWM control method. In this final project will be designed speed control system with PWM method based on ANFIS controller with Fuzzy-PID as the supervision for ANFIS controller. Training data that obtained from Fuzzy-PID will be modified and use as the reference for training FIS with ANFIS Algorithm.

The result from the simulation are when the reference speed constant at 1000 rpm and 2 N.m load ANFIS controller has 0,27 seconds for rise time and 0,08 % steady state error. While PID and Fuzzy-PID with 0,48 seconds and 0,39 second rise time and 0,58% and 0,1% steady state error. When the load varies and the speed reference constant, ANFIS controller tends to has small change of actual speed compared to PID and Fuzzy-PID. When the reference speed varies and the load constant, ANFIS controller has smallest mean value of steady state error. Therefore it can be concluded that ANFIS controller produce more good speed response compared to PID and Fuzzy-PID.

Keywords : BLDC Motor, Controller, ANFIS, PID, Fuzzy-PID, PWM.

--- halaman ini sengaja dikosongkan ---

KATA PENGANTAR

Puji Syukur atas keadirat Tuhan Yang Maha Esa dan segala rahmat yang telah dilimpahkan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul “**DESAIN DAN SIMULASI KONTROL KECEPATAN MOTOR DC *BRUSHLESS* UNTUK SEPEDA MOTOR LISTRIK BERBASIS ANFIS (*ADAPTIVE NEURO FUZZY INFERENCE SYSTEM*)**” dengan tepat waktu.

Tugas akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya pembuatan laporan tugas akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah S.W.T karenal limpahan rahmat dan karunianya sehingga penulis mampu menyelesaikan buku laporan tugas akhir dengan tepat waktu .
2. Keluarga Penulis terutama ayah, ibu, dan adik saya yang selalu mendukung baik secara moral dan material.
3. Bapak Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D dan Bapak Dr. Ir. Soedibyo, M.MT. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan dan petunjuk dalam menyelesaikan laporan tugas akhir.
4. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak ilmu pada saat perkuliahan maupun diluar perkuliahan
5. Teman-teman asisten Laboratorium Konversi Energi Listrik yang telah memberi masukan-masukan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
6. Mas Ridwan selaku perwakilan tim GESITS yang sudah meluangkan waktunya untuk membimbing penulis.
7. Teman-teman e-55 yang saling berjuang dan memberi semangat satu sama lain dalam pengerjaan tugas akhir.
8. Teman-teman saya sewaktu SMA yang sudah memberi dukungan supaya tugas akhir ini dapat selesai tepat waktu.

Penulis menyadari bahwa terdapat banyak ketidaksempurnaan pada laporan tugas akhir ini, oleh karena itu diharapkan saran dari pembaca

agar nantinya laporan tugas akhir ini dapat menjadi referensi yang berguna bagi penelitian selanjutnya.

Surabaya, Januari 2019

Penulis

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
ABSTRAK.....	v
ABSTRACT.....	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Tugas Akhir.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	2
1.5 Metodologi	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
1.7 RELEVANSI.....	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Motor BLDC	7
2.2 Karakteristik Torsi/Kecepatan	12
2.3 Pengaturan Kecepatan Motor BLDC.....	13
2.4 Metode Kontrol Tegangan dengan PWM.....	15
2.5 Sistem Kontrol Kecepatan Motor BLDC.....	15
2.5.1 PID	15
2.5.2 <i>Fuzzy Logic Controller</i>	16
2.5.3 <i>Fuzzy-PID</i>	17
2.6 Algoritma <i>Grid Partition</i>	18
2.7 ANFIS	18
2.8 Karakteristik Respon	19
2.9 Penelitian Sebelumnya	19

BAB 3 DESAIN DAN PERMODELAN SISTEM.....	23
3.1 Sistem Secara Keseluruhan	23
3.2 Inverter dan Suplai DC.....	24
3.3 Motor BLDC	24
3.4 Decoder, Logika Pensaklaran dan PWM Generator....	25
3.6 Kontroler	27
3.6.1 PID.....	27
3.6.2 Fuzzy-PID	28
3.6.3 ANFIS.....	31
BAB 4 HASIL SIMULASI DAN PEMBAHASAN.....	43
4.1 Simulasi <i>Open Loop</i> Sistem Kontrol Kecepatan Motor BLDC.....	43
4.2 Simulasi Sistem Kontrol kecepatan Motor BLDC dengan metode PID, Fuzzy-PID, dan ANFIS	47
4.2.1 Simulasi dengan Kecepatan Referensi Tetap dan Berbeban	48
4.2.2 Simulasi dengan Kecepatan Referensi Tetap dan Beban Berubah.....	50
4.2.3 Simulasi dengan Kecepatan Referensi Berubah dan Beban Tetap	53
BAB 5 PENUTUP	57
5.1 Kesimpulan	57
5.2 Saran.....	58
DAFTAR PUSTAKA	59
LAMPIRAN	61
BIODATA PENULIS	97

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Skema Rotasi Rotor.....	7
Gambar 2. 2	Distribusi Fluks pada Fasa A.....	8
Gambar 2. 3	Rangkaian Ekuivalen Motor BLDC 3 Fasa	10
Gambar 2. 4	Kurva Karakteristik Torsi/Kecepatan motor BLDC	12
Gambar 2. 5	Konfigurasi Saklar Elektrik.....	13
Gambar 2. 6	Skema Proses Komutasi	14
Gambar 2. 7	Metode Kontrol dengan PWM Konvensional	15
Gambar 2. 8	Konfigurasi Kontroler <i>Fuzzy</i> -PID	17
Gambar 2. 9	Struktur <i>Fuzzy Grid Partition</i>	18
Gambar 3. 1	Diagram Keseluruhan Sistem Pengaturan Kecepatan motor BLDC dengan PWM Kontrol ..	23
Gambar 3. 2	Skematik Inverter dan Suplai DC.	24
Gambar 3. 3	Skematik Motor BLDC.....	24
Gambar 3. 4	Skematik <i>Decoder</i> , Logika Pensaklaran dan <i>PWM Generator</i>	25
Gambar 3. 5	Proses Komutasi pada Motor BLDC	26
Gambar 3. 6	Rangkaian Inverter <i>Full Bridge</i>	27
Gambar 3. 7	Diagram kontroler <i>Fuzzy</i> -PID.....	27
Gambar 3. 8	Diagram kontroler <i>Fuzzy</i> -PID.....	28
Gambar 3. 9	Fungsi Keanggotaan dari (a) <i>Input</i> tiap Sub-kontroler. (b) <i>Output</i> Sub-kontroler Kp, (c) <i>Output</i> Sub-kontroler Ki, (d) <i>Output</i> Sub-kontroler Kd.....	30
Gambar 3. 10	Struktur Kontroler ANFIS.	31
Gambar 3. 11	<i>Training Data</i> untuk (a) Sub-Kontroler Kp, (b) Sub-Kontroler Ki (c), Sub-Kontroler Kd Sebelum dilakukan Modifikasi.	33
Gambar 3. 12	<i>Training Data</i> untuk Sub-Kontroler Kd Setelah dilakukan Modifikasi.	33
Gambar 3. 13	Struktur Pelatihan ANFIS.....	34
Gambar 3. 14	<i>Root Mean Square Error</i> pada Pelatihan ANFIS untuk (a) Sub-Kontroler Kp, (b) Sub-Kontroler Ki, (c) Sub-Kontroler Kd.....	39
Gambar 3. 15	(a) Parameter Premis Sebelum Dilatih, Hasil Parameter Premis dari Pelatihan ANFIS untuk (b)	

	Sub-Kontroler Kp, (c) Sub-Kontroler Ki, (d) Sub-Kontroler Kd.	40
Gambar 3. 16	Hasil Perbandingan <i>Output</i> ANFIS dan <i>Training Data</i> untuk (a) Sub-Kontroler Kp, (b) Sub-Kontroler Ki, (c) Sub-Kontroler Kd.	42
Gambar 4. 1	<i>Gating Signal</i> Pada Saat <i>Open Loop</i> (Pada Kondisi <i>Steady state</i>).	43
Gambar 4. 2	Respon Kecepatan pada Saat <i>Open Loop</i>	44
Gambar 4. 3	(a) Respon Arus dan <i>Back EMF</i> pada Fasa A Kumparan Stator, Serta Tegangan antar Fasa A dan B, (b) Respon Arus dan <i>Back EMF</i> pada Fasa A Kumparan Stator, Serta Tegangan antar Fasa A dan B pada Keadaan <i>Transient</i> , (c) Respon Arus pada Fasa A saat <i>Steady State</i> , (d) Arus DC pada Inverter, (e) Torsi Elektromagnetik.....	46
Gambar 4. 4	Kurva Tegangan dan Kecepatan	47
Gambar 4. 5	Respon Kecepatan dengan Kecepatan Referensi Tetap dan Beban Tetap.	48
Gambar 4. 6	(a) Respon Arus pada Fasa A Kumparan Stator, (b) Respon <i>Transient</i> pada Motor.	49
Gambar 4. 7	Torsi Elektromagnetik yang dihasilkan.	50
Gambar 4. 8	Respon Kecepatan dengan Kecepatan Referensi Tetap dan Beban Berubah.	51
Gambar 4. 9	(a) Variasi Pembebanan, (b) Respon Arus pada Fasa A Kumparan Stator	52
Gambar 4. 10	Torsi Elektromagnetik yang dihasilkan.	53
Gambar 4. 11	Respon Kecepatan dengan Kecepatan Referensi Berubah dan Beban Tetap.	53
Gambar 4. 12	(a) Respon Arus pada Fasa A Kumparan Stator, (b)Torsi Elektromagnetik yang dihasilkan.	55

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1	Aturan Inferensi <i>Fuzzy</i> untuk Kp.	29
Tabel 3. 2	Aturan Inferensi <i>Fuzzy</i> untuk Ki.	29
Tabel 3. 3	Aturan Inferensi <i>Fuzzy</i> untuk Kd.	29
Tabel 3. 4	Parameter Konsekuen Sub-Kontroler Kp Hasil Pelatihan ANFIS.	40
Tabel 3. 5	Parameter Konsekuen Sub-Kontroler Ki Hasil Pelatihan ANFIS.	41
Tabel 3. 6	Parameter Konsekuen Sub-Kontroler Kd Hasil Pelatihan ANFIS.	41
Tabel 4. 1	Nilai Tegangan Vab dan Kecepatan Aktual Motor.....	47
Tabel 4. 2	Nilai Kecepatan Aktual dan <i>Steady State Error</i>	54

--- halaman ini sengaja dikosongkan ---

DAFTAR LAMPIRAN

1. Skematik Sistem Secara Keseluruhan	61
2. Skematik <i>Decoder</i>	62
3. Skematik Logika Pensaklaran dan PWM.....	63
4. Skematik Pembanding.....	64
5. <i>Training Data</i>	65

--- halaman ini sengaja dikosongkan ---

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada era sekarang ini harga minyak sebagai bahan bakar yang umum digunakan dalam kendaraan bermotor adalah cenderung naik. Selain itu desain kendaraan bermotor konvensional adalah tergolong lama, sehingga menimbulkan kecenderungan untuk mencari kendaraan yang lebih efisien dan berbasis sumber ramah lingkungan [1]. Kondisi tersebut akan mengarah pada pengembangan kendaraan listrik. Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) mempunyai peran alih dalam pengembangan kendaraan listrik di Indonesia yaitu dengan salah satu produknya adalah *Garasindo Electric Scooter* (GESITS). GESITS merupakan sepeda motor listrik. Jenis motor yang digunakan pada kendaraan GESITS adalah motor BLDC dengan daya 5 kW.

Motor DC *Brushless* atau *BLDC* merupakan jenis motor DC dengan komutasi elektrik. Motor jenis ini mempunyai beberapa sifat diantaranya adalah nilai efisiensi tinggi, *range* kecepatan yang besar, respon dinamik yang cepat, umur operasi yang lama, tingkat keandalan tinggi, dan dapat dikontrol secara akurat [1, 2]. Karena sifat – sifat tersebut motor BLDC banyak digunakan dalam berbagai bidang, salah satunya digunakan pada sepeda motor listrik.

Pada motor BLDC proses komutasi dilakukan secara elektrik. Salah satu metode untuk mengatur kecepatan motor BLDC adalah dengan cara mengatur tegangan pada sisi *stator* dengan metode PWM. Metode tersebut adalah mempunyai struktur yang tidak rumit dan sudah umum diaplikasikan pada motor BLDC [3]. Variasi kecepatan didapatkan dengan mengatur *duty cycle* pada PWM. Diperlukan sistem kontrol untuk mengatur *duty cycle* pada PWM. Sistem kontrol yang umum digunakan pada BLDC adalah PID [1]. Namun PID mempunyai beberapa kekurangan. Salah satu kekurangan PID adalah perubahan secara tiba – tiba pada *set-point* dan variasi pada parameter *plant* yang dikontrol, membuat respon dari PID menjadi buruk [4]. Kontroler *Fuzzy-PID* mempunyai respon yang baik dalam melakukan kontrol pada sistem yang kompleks dan tidak linear, jika dibandingkan dengan PID [5]. Namun pada kontroler *Fuzzy-PID*, apabila diaplikasikan pada mikrokontroler akan membutuhkan memori yang lebih banyak jika dibandingkan dengan

ANFIS [6]. Sistem kontrol menggunakan ANFIS merupakan sistem kontrol kecepatan pada motor BLDC yang menggabungkan sistem kontrol *Fuzzy* dan *Neural Network* [7]. ANFIS bersifat adaptif, sehingga dapat membentuk fungsi keanggotaan dan *rule* dengan cara melakukan *training* pada FIS sesuai dengan data *input* dan *output* yang diinginkan [8]. Selain itu respon kecepatan dari sistem kontrol ANFIS dapat lebih baik dari supervisinya [6]. Oleh karena itu pada tugas akhir ini di desain sistem kontrol kecepatan motor BLDC berbasis ANFIS dengan supervisi *Fuzzy*-PID untuk mengetahui bagaimana respon kecepatan dari motor BLDC.

1.2 Perumusan Masalah

1. Mendesain skema pengaturan tegangan motor BLDC menggunakan metode PWM
2. Mendesain sistem kontrol kecepatan motor BLDC berbasis PID, *Fuzzy*-PID, ANFIS.
3. Menganalisis hasil respon kecepatan pada sistem kontrol kecepatan berbasis ANFIS.
4. Membandingkan hasil respon kecepatan antara sistem kontrol berbasis ANFIS, *Fuzzy*-PID, dan PID.

1.3 Tujuan Tugas Akhir

1. Mendapatkan skema pengaturan tegangan motor BLDC menggunakan metode PWM.
2. Mendapatkan parameter-parameter dari sistem kontrol kecepatan motor BLDC berbasis PID, *Fuzzy*-PID, ANFIS.
3. Memperoleh kriteria respon kecepatan pada sistem kontrol berbasis ANFIS.
4. Mendapatkan perbandingan respon kecepatan antara sistem kontrol berbasis ANFIS, *Fuzzy*-PID, dan PID

1.4 Batasan Masalah

1. Parameter motor BLDC yang digunakan adalah berasal dari motor BLDC GESITS.
2. *Range* kecepatan yang diujikan adalah dari 500 rpm hingga 3000 rpm.
3. *Range* beban yang diujikan adalah dari 1 N.m hingga 8 N.m.

4. Tidak terdapat pengaturan arus pada sistem kontrol kecepatan.
5. Nilai R dan L adalah konstan.
6. Arus *transient* yang timbul pada motor tidak melebihi 500 A.

1.5 Metodologi

1. Studi Literatur

Studi literatur diperlukan untuk memperkuat teori penunjang dalam pengerjaan tugas akhir. Teori penunjang yang dibutuhkan antara lain adalah dasar dari kontroler ANFIS, *Fuzzy-PID*, dan beberapa algoritma kecerdasan buatan seperti RLSE dan *backpropagation*. Studi literatur diperoleh dari membaca *paper*, artikel ilmiah, jurnal, dan berbagai buku yang relevan dengan topik tugas akhir ini.

2. Desain Sistem Kontrol Kecepatan.

Akan didesain sistem kontrol kecepatan BLDC menggunakan PID dan *Fuzzy-PID* terlebih dahulu. *Input* dari kontroler PID adalah *error* dan *output* berupa adalah sinyal kontrol. Lalu untuk kontroler *Fuzzy-PID* *input* dari kontroler FLC adalah *error* dan laju perubahan *error*. *Error* adalah nilai selisih antara kecepatan referensi dan kecepatan yang terukur pada sisi *output* motor BLDC. Sedangkan perubahan *error* didapat dengan cara melakukan operasi *derivative* pada *error*. *Output* dari FLC adalah parameter dari PID yaitu Kp, Ki, dan Kd. *Output* dari PID adalah sinyal kontrol yang terhubung dengan pembangkit PWM untuk mengatur nilai *duty cycle*. *Fuzzy-PID* berperan sebagai supervisi dari ANFIS. *Software* yang digunakan adalah MATLAB. Jenis motor yang digunakan adalah motor BLDC *six steps* dengan output 5 kW.

3. Pengumpulan Data

Setelah dilakukan desain sistem kontrol menggunakan *Fuzzy-PID* pada MATLAB, kemudian akan diambil data *output* dari sistem kontrol tersebut. Data *output* tersebut akan dikombinasikan dengan data *input* yang telah dipilih dan kedua pasang data tersebut dinamakan *training data*. *Training data* akan dimodifikasi agar respon kecepatan kontroler ANFIS menjadi lebih baik. Data *input* adalah berupa nilai *error* dan laju perubahan *error*, lalu data *output* adalah berupa sinyal kontrol.

4. Simulasi

Training data yang didapatkan akan digunakan sebagai acuan untuk melakukan *training* parameter premis dan konsekuensi pada FIS yang telah terbentuk sebelumnya. FIS dibentuk dengan algoritma *grid partition*. Kemudian akan digunakan algoritma ANFIS dalam proses *training*

parameter premis dan konsekuen dari FIS. Metode ANFIS yang digunakan adalah metode *hybrid offline*.

Simulasi kontrol kecepatan motor BLDC berbasis ANFIS dengan cara mengganti FLC pada *Fuzzy-PID* dengan FLC baru yang parameternya sesuai dengan parameter FIS yang telah dilatih dengan algoritma ANFIS. Simulasi digunakan dengan memanfaatkan SIMULINK pada MATLAB.

5. Pembuatan Laporan

Setelah itu hasil dari simulasi akan di analisis dan akan dilakukan pembuatan laporan.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dibagi menjadi lima bab yang terdiri dari :

- Bab 1. Pendahuluan
Bab ini membahas mengenai latar belakang masalah, permasalahan, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi.
- Bab 2. Tinjauan Pustaka
Pada bab ini menjelaskan mengenai dasar teori dan teori pendukung terkait yang relevan terhadap tugas akhir ini. Dasar teori dan teori yang menunjang adalah seperti mengenai kontroler PID, *Fuzzy-PID*, ANFIS dan kontrol tegangan berbasis PWM.
- Bab 3. Desain dan Permodelan Sistem
Pada bab ini akan dijelaskan bagaimana skema rancangan dari skema pengaturan tegangan motor BLDC dengan metode PWM. Kemudian dijelaskan juga bagaimana cara mendapatkan parameter – parameter dari kontroler PID, *Fuzzy-PID*, ANFIS yang telah didesain dan metode apa yang digunakan.
- Bab 4. Hasil Simulasi dan Pembahasan
Akan dipaparkan dan dibandingkan analisis dari hasil simulasi sistem kontrol kecepatan dengan menggunakan PID, *Fuzzy-PID*, dan ANFIS.
- Bab 5. Penutup
Pada bab terakhir ini akan dipaparkan kesimpulan dari penelitian dan saran untuk penelitian ini, agar kedepannya dapat menjadi referensi yang berguna dalam pengembangan sistem kontrol kecepatan motor BLDC.

1.7 RELEVANSI

Tugas akhir ini diharapkan dapat memberi manfaat sebagai berikut:

1. Sebagai referensi bagi peneliti lain yang ingin melakukan penelitian tentang sistem kontrol kecepatan motor BLDC berbasis ANFIS.
2. Sebagai referensi untuk pengembangan sistem kontrol kecepatan motor BLDC pada kendaraan GESITS.

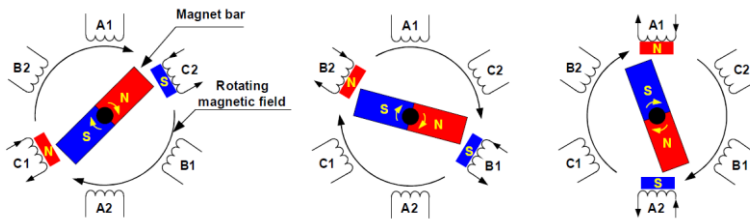
--- halaman ini sengaja dikosongkan ---

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Motor BLDC

Bagian utama motor BLDC diantaranya adalah stator dan rotor. Pada motor BLDC 3 fasa, mempunyai 3 kumparan pada bagian stator. Terdapat 2 tipe kumparan stator yaitu *sinusoidal* dan *trapezoidal* [2]. Kedua tipe tersebut dikategorikan berdasarkan bentuk dari sinyal BEMF (*Back Electromotive Force*). Bentuk dari sinyal BEMF ditentukan oleh perbedaan hubungan kumparan dan jarak dari celah udara [2]. Motor dengan bentuk sinyal BEMF *sinusoidal* menghasilkan torsi elektromagnetik yang lebih halus jika dibandingkan dengan motor dengan bentuk sinyal *trapezoidal*, namun harganya akan menjadi lebih mahal karena dibutuhkan komponen tambahan seperti *chopper windings* [2]. Pada motor BLDC jenis kumparan statornya adalah *trapezoidal*. Pada rotor terdapat shaft dan permanent magnet. Prinsip kerja motor BLDC adalah berdasarkan gaya tarik dan gaya lawan antara kutub magnet [9]. Arus melewati salah satu dari kumparan stator, dan menghasilkan kutub magnet yang akan menarik kutub yang berlawanan dari magnet permanent yang terdekat. dengan secara bergantian mengalirkan arus pada kumparan stator, maka akan menyebabkan rotor akan berputar [2].



Gambar 2. 1 Skema Rotasi Rotor [2].

Persamaan diferensial dari motor BLDC 3 fasa dengan hubungan stator *wye*, jenis kumparan *full-pitch*, mempunyai jenis rotor *salient* dan *Hall sensor* adalah terpisah sebesar 120° elektrik dapat diturunkan sebagai berikut [10]:

Tegangan tiap fasa pada kumparan motor BLDC dapat dituliskan dalam

$$u_x = R_x i_x + e_{\psi x} \quad (2.1)$$

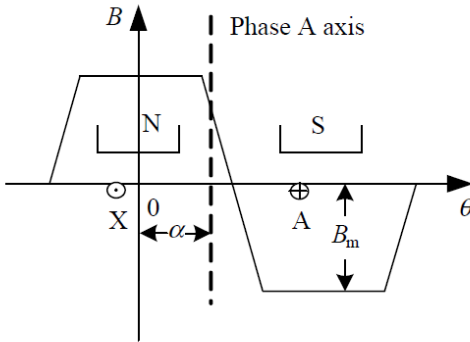
Dimana u , i , dan R adalah tegangan, arus, dan resistansi pada fasa x (fasa A, B, dan C). Sementara e_{ψ} adalah emf yang terinduksi pada fasa x . Besar emf yang terinduksi adalah sebanding dengan laju perubahan fluks.

$$e_{\psi x} = \frac{d\psi_x}{dt} \quad (2.2)$$

Kemudian besar fluks pada fasa A adalah :

$$\psi_A = L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C + \psi_{PM}(\theta), \quad (2.3)$$

Dimana ψ_{PM} adalah *flux linkage* yang disebabkan oleh permanent magnet pada fasa A, θ adalah sudut yang menyatakan posisi rotor, L_A adalah induktansi diri, M_{AB} dan M_{AC} adalah induktansi bersama fasa A dengan fasa B dan C. Besar dari $\psi_{PM}(\theta)$ bergantung pada distribusi medan magnet dari magnet permanen pada celah udara. Komponen radial dari medan magnet pada celah udara yang ditimbulkan oleh magnet permanen terdistribusi secara *trapezoidal* sepanjang permukaan dalam dari stator seperti yang ditunjukkan gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Distribusi Fluks pada Fasa A [10].

Seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2.2, ketika rotor berputar berlawanan arah jarum jam, kumparan AX bergerak searah sepanjang

sumbu θ . Lalu nilai efektif dari fluks pada fasa A akan berubah sejalan dengan perubahan posisi rotor. Besarnya *flux linkage* pada fasa A karena magnet permanen adalah sebanding dengan banyaknya lilitan (N) dan nilai fluks pada fasa A yang ditimbulkan karena magnet permanen. Apabila rotor sedang berada pada posisi a , maka besarnya *fluks linkage* pada fasa A adalah :

$$\psi_{PM}(a) = NS \int_{-\frac{\pi}{2}+a}^{\frac{\pi}{2}+a} B(\theta) d\theta \quad (2.4)$$

Dengan $B(\theta)$ adalah kerapatan fluks radial pada celah udara yang disebabkan oleh magnet permanen pada rotor,

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.2)- (2.4) ke dalam (2.1) maka didapatkan persamaan :

$$\begin{aligned} u_A &= Ri_A + \frac{d}{dt} (L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C + \psi_{PM}(\theta)) \\ &= Ri_A + \frac{d}{dt} (L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C) + \frac{d}{dt} (NS \int_{-\frac{\pi}{2}+a}^{\frac{\pi}{2}+a} B(\theta) d\theta) \\ &= Ri_A + \frac{d}{dt} (L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C) + e_A \end{aligned} \quad (2.5)$$

Apabila jenis rotor dari motor BLDC ada *non salient*, maka nilai induktansi diri dan bersama adalah tetap dan tidak tergantung pada posisi rotor. Hal tersebut dikarenakan pada magnet permanen jenis *non salient* fluks yang ditimbulkan adalah bersifat *isotropic*. Kemudian apabila kumparan fasa stator adalah simetris maka $L_A = L_B = L_C = L$ dan $M_{AB} = M_{BA} = M_{BC} = M_{CB} = M_{AC} = M_{CA} = M$. Sehingga persamaan (2.5) dapat dituliskan menjadi :

$$u_A = Ri_A + L \frac{di_A}{dt} + M \frac{di_B}{dt} + M \frac{di_C}{dt} + e_A \quad (2.6)$$

Dengan,

$$\begin{aligned} e_A &= \frac{d}{dt} (NS \int_{-\frac{\pi}{2}+\theta}^{\frac{\pi}{2}+\theta} B(x) dx) \\ &= NS \left[B\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right) - B\left(-\frac{\pi}{2} + \theta\right) \right] \frac{d\theta}{dt} \end{aligned}$$

$$= NS\omega[B\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right) - B\left(-\frac{\pi}{2} + \theta\right)] \quad (2.7)$$

Besaran ω adalah kecepatan sudut dari motor. Pada gambar 2.2 Terlihat bahwa $B(\theta)$ memiliki periode sebesar 2π dan $B(\theta + 1) = -B(\theta)$ maka :

$$\begin{aligned} e_A &= NS\omega[B\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right) - B\left(\frac{\pi}{2} + \theta + \pi - 2\pi\right)] \\ &= 2NS\omega[B\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right)] \end{aligned} \quad (2.8)$$

Nilai *back-EMF* adalah mendahului sebesar 90° elektrik dari kerapatan medan pada celah udara, dan e_A dapat dinyatakan sebagai :

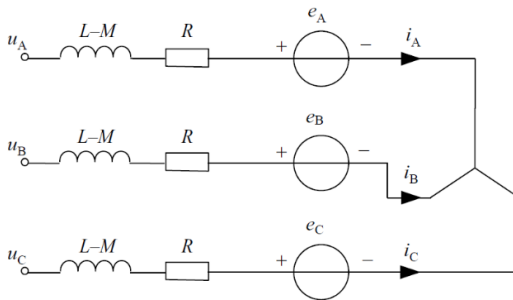
$$e_A = 2NS\omega B_m f_A(\theta) = \omega \psi_m f_A(\theta) \quad (2.9)$$

Dimana B_m dan ψ_m adalah nilai maksimum dari kerapatan medan pada celah udara dan nilai maksimum dari *flux linkage* pada tiap fasa stator. Kemudian $f_A(\theta)$ adalah fungsi dari gelombang *back-EMF* dari fasa A dan memiliki nilai minimum dan maksimum adalah -1 dan 1. Pada motor BLDC 3 fasa dengan kumparan stator adalah simetris maka untuk fasa B dan C

$$f_B(\theta) = f_A\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.10)$$

$$f_C(\theta) = f_A\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.11)$$

Pada motor BLDC 3 fasa memiliki rangkaian ekuivalen pada sisi stator adalah sebagai berikut :



Gambar 2. 3 Rangkaian Ekuivalen Motor BLDC 3 Fasa [10] .

Pada rangkaian equivalen tersebut berlaku hukum arus,

$$i_A + i_B + i_C = 0 \quad (2.12)$$

Maka persamaan dapat disederhanakan menjadi,

$$u_A = Ri_A + (L - M) \frac{di_A}{dt} + e_A \quad (2.13)$$

Sehingga persamaan matriks tegangan fasa pada tiap kumparan stator motor BLDC adalah sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_A \\ u_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_A \\ i_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L - M & 0 & 0 \\ 0 & L - M & 0 \\ 0 & 0 & L - M \end{bmatrix} \frac{d}{dx} \begin{bmatrix} i_A \\ i_A \\ i_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A \\ e_A \\ e_A \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Sedangkan persamaan matriks untuk tegangan antar fasanya didapatkan dari pengurangan tegangan antar fasa dan didapatkan :

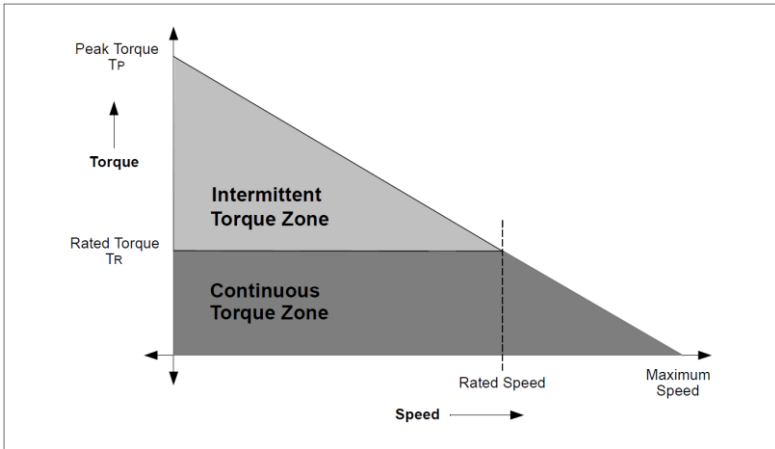
$$\begin{bmatrix} u_{AB} \\ u_{AC} \\ u_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & -R & 0 \\ 0 & R & -R \\ -R & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_A \\ i_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L - M & M - L & 0 \\ 0 & L - M & M - L \\ M - L & 0 & L - M \end{bmatrix} \frac{d}{dx} \begin{bmatrix} i_A \\ i_A \\ i_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A - e_B \\ e_B - e_C \\ e_C - e_A \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Sementara torsi elektromagnetik dapat dirumuskan [7] :

$$Tem = J \frac{d\omega t}{dt} + B\omega r + T_L \quad (2.14)$$

Dimana J, B, ωr dan T_L masing – masing adalah momen Inersia, koefisien gesek, kecepatan sudut, dan torsi beban dari motor.

2.2 Karakteristik Torsi/Kecepatan

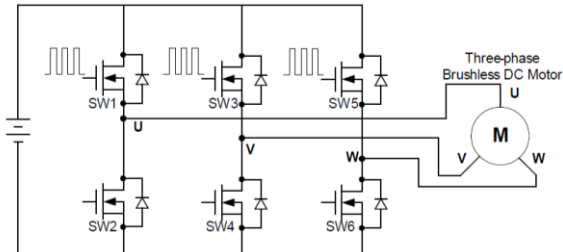


Gambar 2. 4 Kurva Karakteristik Torsi/Kecepatan motor BLDC [11].

Pada gambar 2.4 merupakan karakteristik torsi/kecepatan dari motor BLDC secara umum. Terdapat dua jenis torsi pada motor BLDC yaitu *peak torque* dan *rated torque*. Parameter tersebut dijadikan acuan didalam menentukan spesifikasi motor BLDC. Pada saat operasi secara kontinyu motor dapat diberi beban hingga menacapai nilai dari *rated torque*. Apabila motor dioerprasikan dalam *range* diam hingga kecepatan ratingnya maka torsi yang dihasilkan adalah dapat bernilai konstan. Motor BLDC dapat dioperasikan dengan kecepatan bernilai 150 % dari *rating* kecepatannya, namun torsi yang dihasilkan akan mulai menurun [11]. Terdapat dua zona dala kurva torsi/kecepatan motor BLDC yaitu *intermittent torque zone* dan *continuous torque zone*. Pada zona *intermittent* motor dapat menghasilkan torsi dengan nilai diatas rating torsi namun dalam jangka waktu yang cepat dan tidak kontinyu, Sedangkan pada zona *continuous* motor dapat dioperasikan dengan torsi sama dengan atau dibawah nilai *ratingnya* secara kontinyu dan terus menerus. Motor akan bekerja pada zona *intermittent* adalah pada saat keadaan *starting*. Pada saat ini motor akan berputar menuju kecepatan referensi dari keadaan diam dengan percepatan tertentu. Dengan demikian akan dibutuhkan torsi tambahan untuk mengkompensasi inersia dari beban dan rotor dari motor itu sendiri.

2.3 Pengaturan Kecepatan Motor BLDC

Motor BLDC menggunakan saklar elektrik untuk melakukan proses komutasi. Untuk motor BLDC 3 fasa, saklar elektrik tersusun dengan konfigurasi jembatan 3 fasa.



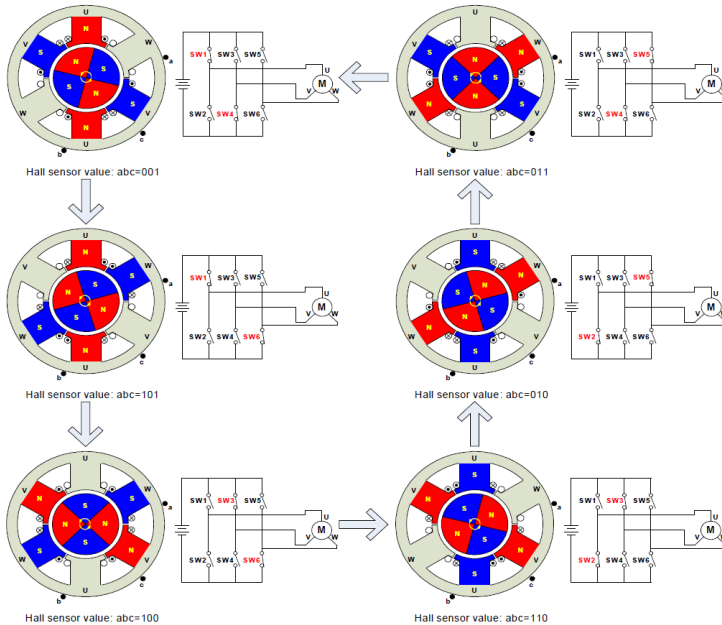
Gambar 2. 5 Konfigurasi Saklar Elektrik [2].

Motor BLDC 3 fasa memerlukan 3 *hall sensor* (Ha, Hb, dan Hc) untuk mendeksi posisi rotor [9]. *Hall sensor* mempunyai 2 tipe *output* yaitu 60° dan 120°, berdasarkan posisi dari *hall sensor* [2]. Dengan menggabungkan 3 *hall sensor* tersebut, maka akan dapat ditentukan urutan komutasi dari motor dan akan didapatkan 8 keadaan dari 3 hall sensor mula dari 000 hingga 111. Namun karena batasan dari perangkat, kondisi 000 dan 111 tidak mungkin muncul [9]. Sehingga hanya terdapat 6 status dari kombinasi hall sensor. Butuh 6 langkah untuk menyelesaikan 1 siklus elektrik. Pada setiap langkah, satu terminal dialiri arus dan satu terminal lainnya dilalui arus dengan arah berlawanan. Sementara terminal ketiga dibiarkan tidak dialiri arus. Pada setiap keadaan komutasi hanya 1 *hall sensor* yang berubah nilainya. Apabila diringkas menjadi tabel, berikut adalah tabel komutasi pada keadaan tiap langkah :

Tabel 2. 1 Keadaan *Hall Sensor* pada Proses Komutasi [2].

<i>Hall sensor</i>			<i>Phase</i>		
a	b	c	A	B	V
0	1	1	<i>open</i>	-	+
0	0	1	+	-	<i>open</i>
1	0	1	+	<i>open</i>	-
1	0	0	<i>open</i>	+	-
1	1	0	-	+	<i>open</i>
0	1	0	-	<i>open</i>	+

Kemudia sinya *hall* tersebut nantinya akan menentukan IGBT/MOSFET mana yang akan mengalami konduksi pada proses komutasi. Apabila digambarkan maka skemas proses komutasi adalah :



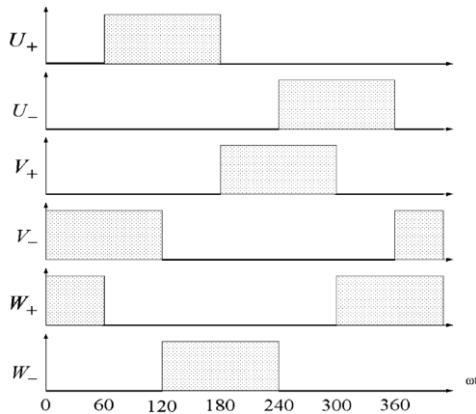
Gambar 2. 6 Skema Proses Komutasi [2].

Pada gambar 2.6 menunjukan kumparan stator dari motor BLDC dengan fasa U, V, dan W adalah mengalami konduksi atau tidak konduksi (*floate*d) adalah berdasarkan sinyal *hall* a, b, dan c. Pada contoh ini motor berputar dengan arah berlawanan jarum jam.

Besar tegangan pada kumparan stator dari motor BLDC akan mempengaruhi kecepatan motor BLDC, sehingga dengan mengatur tegangan pada kumparan stator sama dengan mengatur kecepatan motor. Variasi dari tegangan stator dapat didapatkan dari pengaturan *duty cycle* dari sinyal PWM yang mencacah *gating signal* [1].

2.4 Metode Kontrol Tegangan dengan PWM

Sinyal PWM berperan sebagai pengatur MOSFET/IGBT pada inverter. Inverter dikontrol dengan dengan sinyal PWM yang mengatur proses komutasi dengan cara membuat 2 dari 3 fasa adalah dalam keadaan konduksi dan 1 dalam keadaan *floating*. Dengan demikian maka akan terbentuk rotasi fluks pada stator.



Gambar 2. 7 Metode Kontrol dengan PWM Konvensional [3].

Pada gambar 2.7 merupakan salah satu metode kontrol PWM konvensional yang disebut sebagai metode PWM 120°. Metode ini menimbulkan *switching losses* yang kecil pada sisi inverter dengan konten harmonik besar sehingga menyebabkan *losses* yang besar pada sisi motor [3]. Frekuensi sinyal PWM yang mencacah *gating signal* harus lebih besar daripada frekuensi putaran motor. Secara umum, frekuensi sinyal PWM minimal 10 kali lebih besar dari frekuensi maksimum putaran motor[2].

2.5 Sistem Kontrol Kecepatan Motor BLDC

2.5.1 PID

Kontroler PID adalah jenis kontroler yang umum digunakan pada dunia industri dikarenakan sifatnya yang simpel, *robust*, dan memiliki keandalan tinggi. Fungsi transfer dari controller PID yang dinyatakan dalam domain s adalah [4]:

$$K(S) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2.3)$$

Dimana K_p, K_i, K_d adalah *proportional, integral, dan derivative gain*. Kontroler PID menghitung nilai deviasi *error* antara nilai referensi dan nilai aktual. Lalu keluaran dari kontroler PID adalah sinyal kontrol dengan kombinasi linear dari parameter *proportional, integral, dan derivative gain* yang mengatur suatu *plant*. Salah satu contoh metode untuk *tuning* parameter PID adalah *trial and error*. Pada umumnya *tuning* parameter *proportional* dilakukan terlebih dahulu sementara parameter *integral* dan *derivative* adalah dibuat menjadi 0. Kemudian setelah itu dilakukan *tuning* pada parameter *integral* dan terakhir adalah parameter *derivative* [10]. Efek yang ditimbulkan dari pengaturan K_p, K_i, K_d pada sistem *closed loop* adalah nilai K_p yang besar akan membuat mempercepat *rise time* dari respon sistem dan mengurangi *steady state error*. Kemudian pada pengaturan K_i , akan memperkecil nilai *steady state error* namun akan membuat respon menjadi buruk. Pada saat *tuning* parameter K_i adalah dimulai dengan nilai yang kecil. Lalu parameter K_d akan meningkatkan stabilitas dari sistem, mengurangi *overshoot*, dan membuat respon *transient* menjadi lebih baik. Kontroler PID merupakan penjumlahan dari keluaran kontroler P, Kontroler I, dan Kontroler D.

2.5.2 Fuzzy Logic Controller

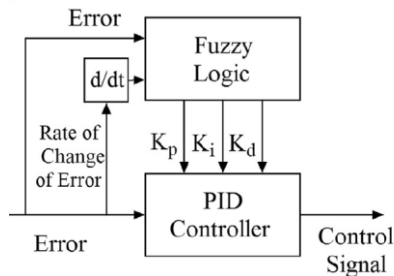
FLC (*Fuzzy Logic Controller*) Adalah algoritma kontrol berdasarkan linguistik yang mewakili pengetahuan manusia untuk mengontrol sistem tanpa harus mengetahui model matematika [12]. *Fuzzy Logic Controller* atau dapat disebut *Fuzzy Inference System* (FIS) terdiri dari 5 blok utama yaitu *Rule Base, Database, Decision-Making Unit, Fuzzification Interface, dan Defuzzification Interface* [8]. Pada *Rule Base* terdiri dari jumlah *fuzzy if-then rules* yang digunakan. Lalu pada blok database merupakan fungsi keanggotaan dari *fuzzy sets* yang digunakan pada *fuzzy rules*. Fungsi keanggotaan adalah representasi grafik dari besar nilai partisipasi tiap input. Ada beberapa jenis fungsi keanggotaan diantaranya adalah fungsi berbentuk lonceng dan *gauss*. *Rule base* dan *database* dapat disebut juga sebagai *knowledge base*. Pada *decision making unit* adalah blok dimana dilakukan operasi inferensi pada rules. Proses untuk merubah variabel numerik (*crisp variables*) menjadi variabel linguistik disebut sebagai fuzzifikasi. Kebalikan dari fuzzifikasi adalah defuzzifikasi. Langkah dari operasi inferensi pada *fuzzy if-then*

rules yang dijalankan oleh *Fuzzy Inference Systems* (FIS) adalah sebagai berikut [8]:

1. Membandingkan variabel *input* dengan fungsi keanggotaan pada bagian premis untuk mendapatkan nilai derajat keanggotaan pada setiap label linguistik. Proses ini juga disebut sebagai *fuzzification*.
2. Menggabungkan (dengan operasi *T-norm*, umumnya *multiplication* atau *min.*) nilai derajat keanggotaan pada bagian *premise* untuk mendapatkan *firing strength* atau bobot dari setiap *rule*.
3. Menetapkan bagian konsekuen dari tiap *rule* berdasarkan dari bobot.
4. Melakukan agregasi pada bagian konsekuen untuk mendapatkan nilai yang sesungguhnya (*crisp*).

2.5.3 Fuzzy-PID

Berikut Diagram dari *Fuzzy-PID* [7]:



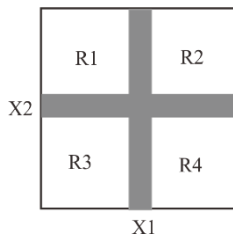
Gambar 2. 8 Konfigurasi Kontroler *Fuzzy-PID* [2].

Pada kontroler *Fuzzy-PID* terbagi menjadi 2 bagian utama yaitu sistem kontrol *Fuzzy* dan *PID*. Output dari kontroler *fuzzy* adalah parameter dari *PID* yaitu K_p , K_i , dan K_d . Sedangkan input dari *PID* adalah *error* dan outputnya adalah sinyal kontrol. Pada umumnya, kontroler *fuzzy* dengan satu dimensi adalah digunakan pada sebuah plant. Pada tipe ini hanya satu *error* sinyal yang digunakan sebagai sinyal input. Pada kontroler tipe ini memiliki performa dinamik yang jelek. Semakin tinggi dimensi dari kontroler *fuzzy* maka akan menyebabkan perform dari *plant* yang dikontrol akan menjadi lebih baik. Namun demikian dimensi dari kontroler *fuzzy* yang tinggi akan menyebabkan *rules* dan algoritma *fuzzy* menjadi lebih kompleks, sehingga sebagian besar kontroler *fuzzy* memiliki dimensi tidak lebih besar dari 3 dan kontroler *fuzzy* dengan dengan jumlah dimensi 2 adalah lebih sering digunakan. Pada kontroler *fuzzy* 2 dimensi memiliki

2 *input* yaitu *error* dan laju perubahan *error*. Perubahan *error* didapat dengan melakukan operasi *derivative* pada sinyal *error*.

2.6 Algoritma Grid Partition

Fuzzy Grid Partition dapat menentukan jumlah *rules* yang meliputi suatu model [13]. *Grid partition* adalah metode yang paling umum digunakan dalam partisi *fuzzy*. Terdapat tiga jenis partisi *fuzzy* yaitu *grid partition*, *tree partition*, dan *scatter partition*. Berikut adalah contoh struktur dari *Fuzzy Grid Partition*. X merepresentasikan *input* dan R merepresentasikan *output*.



Gambar 2. 9 Struktur *Fuzzy Grid Partition*.

2.7 ANFIS

Salah satu metode kontrol BLDC adalah menggunakan ANFIS (*Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*). ANFIS merupakan kumpulan jaringan yang mampu Melakukan *training* pada FIS (*Fuzzy Inference System*) Takagi Sugeno yang telah dibentuk sebelumnya [8]. Struktur dari ANFIS adalah terdiri dari *link* dan *node*. Terdapat dua jenis *node* yaitu *node* dengan parameter tetap dan berubah. Formula bervariasi untuk setiap *node*, tergantung dari fungsi *input* dan *output* yang akan dicapai oleh jaringan adaptif. Perbedaan jaringan pada ANFIS dan Neural Network adalah pada ANFIS tiap *link* hanya mengindikasikan arah dari aliran sinyal antar *node*, dan tidak mempengaruhi bobot [8]. Metode dalam pembelajaran parameter ANFIS dapat dilakukan secara *online* maupun *offline* [14]. Pada metode *offline*, *update* parameter dilakukan secara menyeluruh setelah *training data* telah tersedia. Sedangkan pada metode *online* parameter akan di *update* langsung pada setiap pasang data *input* dan *output*. Pembelajaran untuk parameter baik pada bagian premis maupun konsekuensi dapat dilakukan dengan menerapkan algoritme tertentu seperti *backpropagation* (*gradient descent*) dan RLSE. Algoritma yang digunakan untuk pembelajaran parameter pada bagian konsekuensi

maupun premis dapat berbeda, atau disebut sebagai *hybrid learning* [8]. Algoritma *hybrid* adalah lebih umum digunakan karena apabila hanya menggunakan algoritma *back propagation* untuk melakukan *update* pada parameter premis dan konsekuen maka akan membutuhkan waktu konvergen yang lama dan dapat terperangkap pada titik lokal minimum.

2.8 Karakteristik Respon

Karakteristik respon yang dianalisis dalam penelitian ini diantaranya adalah :

- *Rise Time* : Merupakan besaran waktu yang menyatakan lamanya respon sistem mencapai nilai dari 10 % hingga 90% respon *steady state*.
- *Time Constant* : Merupakan besaran waktu yang menyatakan lamanya respon mencapai nilai 63.2 % dari respon *steady state*.
- *Error Steady State* : Merupakan nilai *error* pada saat keadaan *steady state*. Besarnya adalah selisih antara nilai rata - rata keluaran sistem pada saat *steady state* dan nilai referensi dibagi dengan nilai referensi kemudian dinyatakan dalam persen.

2.9 Penelitian Sebelumnya

Pada referensi [7] telah dilakukan simulasi kontrol kecepatan pada motor BLDC menggunakan ANFIS dengan supervisi berupa *Fuzzy-PID*. Data *input* dan *output* yang digunakan untuk proses *training* parameter FIS didapatkan dari kontroler *Fuzzy-PID*. Terdapat 2 *input* pada kontroler *Fuzzy-PID* yaitu *error* dan laju perubahan *error*. *Error* merupakan hasil selisih antara kecepatan yang terukur pada *tachogenerator* dan kecepatan referensi serta laju perubahan *error* didapatkan dengan melakukan *derivative* pada *error*. Lalu *output* dari kontroler adalah sinyal kontrol yang mengatur besarnya *duty cycle* pada *PWM Generator*. Sinyal kontrol tersebut nantinya akan dikombinasikan dengan posisi dari rotor untuk mengatur proses *switching* pada inverter. Data *input* dan *output* yang didapatkan dari *Fuzzy-PID* kemudian dimodifikasi agar didapatkan respon kecepatan yang baik. Lalu dilakukan simulasi pada MATLAB dengan beberapa kondisi. Pada kondisi pertama yaitu dengan beban dan kecepatan referensi konstan. Respon kecepatan sistem kontrol ANFIS dibandingkan dengan PI, FVS (*Fuzzy Structure Control*), dan *Fuzzy PID*. Lalu didapatkan hasil bahwa kontroler ANFIS mampu menghasilkan respon kecepatan yang lebih baik dibanding 3 jenis kontroler lainnya. Nilai *peak time*, *settling time* dan *steady state error* pada kontroler

ANFIS adalah memiliki nilai yang paling kecil. Lalu kondisi kedua adalah dengan kecepatan referensi tetap dan torsi beban yang berubah-ubah. Di dapatkan Hasil bahwa saat beban turun, pada kontroler PI dan *Fuzzy PID* respon kecepatan akan mengalami *overshoot* pada interval tertentu setelah beban turun, lalu kembali seperti semula. Begitu juga saat beban naik, kontroler tersebut akan mengalami *undershoot* dan kembali seperti semula dengan interval tersebut. Namun berbeda pada kontroler ANFIS, pada saat beban naik maupun turun, respon kecepatan tidak mengalami *overshoot* maupun *undershoot*. dan pada kondisi ketiga adalah dengan membuat kecepatan referensi bervariasi dan beban konstan. Parameter yang diamati pada kondisi ini adalah *steady state error* dan *recovery time*. Pada saat kecepatan referensi berubah baik menjadi lebih besar maupun lebih kecil, kontroler ANFIS mempunyai nilai *steady state error* dan *recovery time* yang paling kecil. Dari semua hasil simulasi yang telah dilakukan, disimpulkan bahwa hasil respon kecepatan pada motor BLDC menggunakan ANFIS adalah lebih baik jika dibandingkan dengan kontroler PI, *Fuzzy PID*, dan FVS.

Pada referensi [15] telah dilakukan simulasi kontrol kecepatan pada motor BLDC GESITS. Kontroler yang digunakan adalah menggunakan *Fuzzy-PID* dengan metode kontrol arus *hysteresis*. Pada metode ini arus keluaran inverter akan mengikuti arus referensi pada batasan *hysteresis band* dengan cara mengatur kondisi pensaklaran inverter 3 fasa. *Input* dari kontroler *Fuzzy-PID* adalah *error* dan laju perubahan *error*, sedangkan *outputnya* adalah merupakan torsi referensi yang nantinya akan dirubah menjadi arus referensi. Arus referensi akan masuk bersama arus aktual ke dalam *hysteresis current control* dan output dari *hysteresis current control* adalah sinyal pensaklaran yang mengatur penyalan transistor pada inverter. Simulasi dilakukan dalam 3 kondisi yaitu pada kecepatan referensi beban tetap, kecepatan referensi tetap beban berubah, dan kecepatan referensi berubah beban tetap. Hasil dari sistem kontrol *Fuzzy-PID* akan dibandingkan dengan kontroler PID

Pada kondisi pertama kecepatan referensi adalah diatur sebesar 1000 rpm dengan 2 N.m. Terlihat kontroler *Fuzzy-PID* menghasilkan nilai *steady state error* yang lebih kecil dan *rise time* yang lebih cepat pada respon kecepatan. Hal tersebut mengindikasikan kontroler *Fuzzy-PID* mempunyai performa yang lebih baik dibanding dengan PID. Begitu juga pada kondisi kecepatan referensi tetap sebesar 1000 rpm dan beban berubah, pada kontroler *Fuzzy-PID* menunjukkan perubahan kecepatan yang tidak signifikan jika dibandingkan dengan PID

ketika terjadi perubahan beban. Kemudian pada saat kondisi beban adalah tetap dan kecepatan referensi berubah, kontroler *Fuzzy-PID* menunjukkan nilai *steady state error* yang lebih kecil jika dibandingkan dengan *PID*.

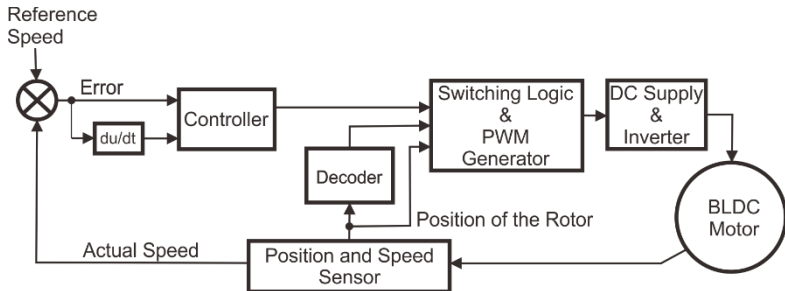
--- halaman ini sengaja dikosongkan ---

BAB 3

DESAIN DAN PERMODELAN SISTEM

Perancangan model sistem kontrol kecepatan motor BLDC dilakukan menggunakan *software* simulink MATLAB. Di dalam model simulink yang telah didesain tersusun atas beberapa bagian diantaranya adalah Inverter dan Suplai DC, Motor BLDC, *Decoder*, *PWM Generator* dan Logika Pensaklaran.

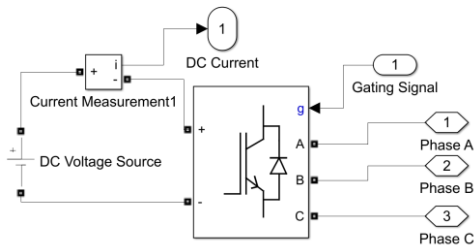
3.1 Sistem Secara Keseluruhan



Gambar 3. 1 Diagram Keseluruhan Sistem Pengaturan Kecepatan motor BLDC dengan PWM Kontrol.

Posisi rotor dan kecepatan motor akan didapatkan dari *hall sensor* dan *tachogenerator*. *Output* kecepatan aktual motor akan dibandingkan dengan kecepatan referensi untuk menghasilkan *error* dan laju perubahan *error*. Laju perubahan *error* didapat dengan melakukan operasi diferensial pada sinyal *error*. *Error* dan laju perubahan *error* akan menjadi *input* dari kontroler ANFIS dan Fuzzy-PID. Sedangkan untuk kontroler PID hanya mempunyai satu *input* yaitu *error*. *Output* dari kontroler adalah sinyal kontrol yang terhubung dengan *PWM Generator*. Sinyal kontrol tersebut mengatu besar *duty cycle* dari sinyal PWM yang dibangkitkan. Sinyal PWM akan dihubungkan secara *AND* dengan *gating signal* yang dihasilkan oleh logika pensaklaran, sehingga *gating signal* akan tercacah dan nilai tegangan dari stator akan dapat divariasi [1]. Sebelum *gating signal* masuk ke inverter, terlebih dahulu akan dibandingkan dengan *emf* dan sinyal *hall* supaya menghasilkan skema sinyal PWM sesuai dengan yang diinginkan.

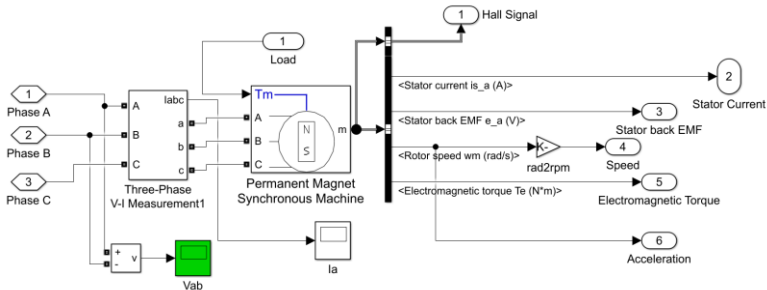
3.2 Inverter dan Suplai DC



Gambar 3. 2 Skematik Inverter dan Suplai DC.

Inverter yang digunakan adalah jenis *full bridge*, sehingga tersusun atas 6 buah IGBT. Nilai dari parameter *snubber resistance*, *snubber capacitance*, dan hambatan dalam IGBT (R_{on}) adalah masing- masing ditentukan sebesar $5000\ \Omega$, 10^{-6} Farad, dan $10^{-3}\ \Omega$.

3.3 Motor BLDC



Gambar 3. 3 Skematik Motor BLDC.

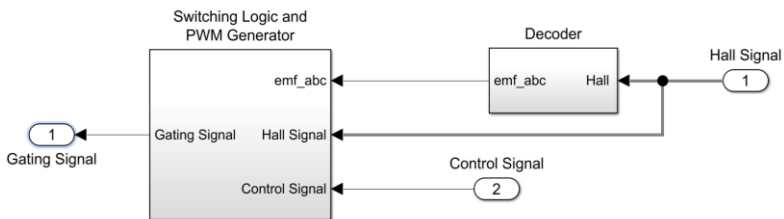
Motor BLDC akan terhubung dengan instrumen untuk mengukur tegangan dan arus. Nilai parameter – parameter dari model motor adalah didapatkan dari motor BLDC GESITS yaitu resistansi tiap fasa stator (R), induktansi tiap fasa stator (L), konstanta torsi (K_t), konstanta tegangan (K_e), inersia (J), *viscous damping* (B), dan jumlah pasang kutub adalah memiliki nilai masing-masing sebesar $0,04335\ \Omega$; $105,2665\ \mu\text{H}$; $0,180815\ \text{N.m/A}$; $18,935\ \text{volt/krpm}$; $0,059009\ \text{Kg.m}^2$; $0,016158\ \text{N.m.s}$; dan 4 pasang kutub. Sedangkan nilai *rating* dari model motor BLDC GESITS adalah dengan tegangan (V), arus (I), daya (P), torsi (T), dan

kecepatan adalah sebesar 100 Volt; 61,4 A; 5 kW; 11,1 N.m; 5000 rpm. Kemudian pada motor BLDC akan dilengkapi dengan *hall sensor* yang berperan dalam mengirimkan sinyal untuk proses komutasi.

3.4 Decoder, Logika Pensaklaran dan PWM Generator

Pada *decoder* sinyal yang diberikan oleh hall sensor akan dirubah menjadi sinyal EMF (*Electromotive Force*) yaitu sinyal yang mengindikasikan apakah pada tiap fasa stator akan diberi tegangan positif (*high*), negatif (*low*), atau tidak diberi tegangan (*floating*)

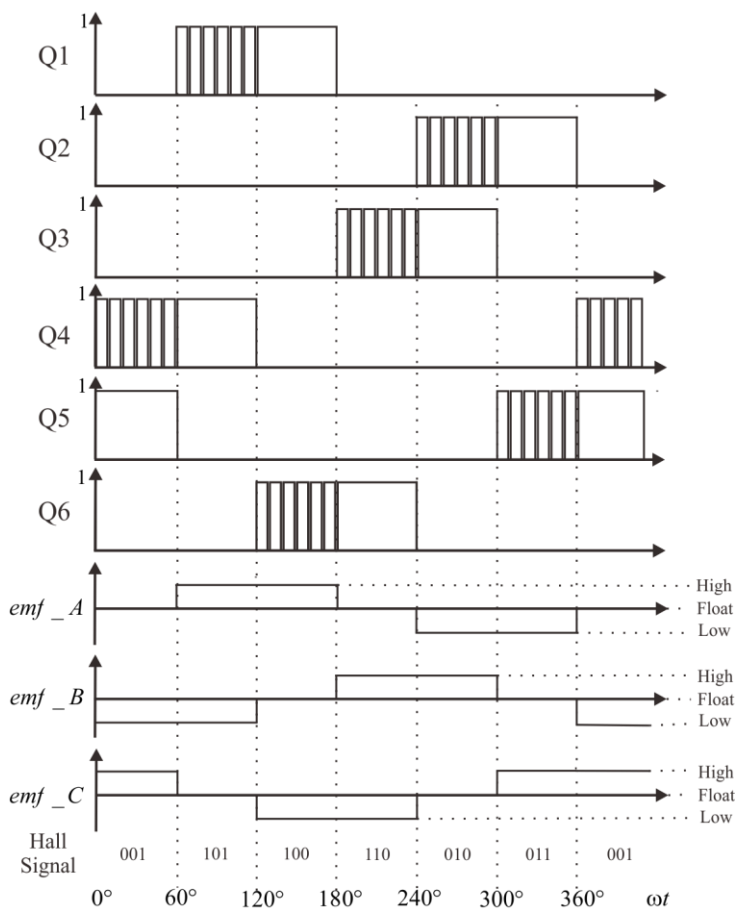
Kemudian sinyal EMF akan dirubah menjadi sinyal pensaklaran (*gating signal*) yaitu sinyal yang mengatur IGBT mana saja yang bekerja dan tidak bekerja. *Gating signal* tersebut akan mengatur proses komutasi sehingga motor akan berputar. Kecepatan putar motor akan tergantung pada besarnya tegangan yang diberikan pada motor. Besar dari RMS tegangan yang diberikan pada tiap fasa motor dapat diatur dengan menggunakan metode PWM. Sinyal PWM akan terhubung secara *AND* dengan *gating signal*, sehingga *gating signal* akan tercacah dan tegangan pada motor dapat bervariasi sesuai dengan *duty cycle* dari sinyal PWM. Sinyal PWM didapatkan dengan membangkitkan sinyal segitiga yang dihubungkan dengan sinyal kontrol keluaran kontroler yang mengatur besarnya *duty cycle* mulai dari 0 hingga 100 %. Besar dari frekuensi sinyal segitiga adalah 25 kHz.



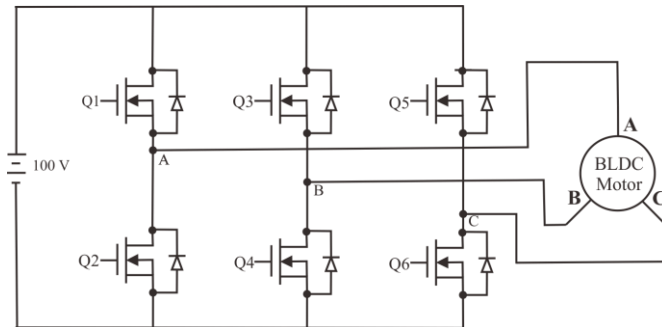
Gambar 3. 4 Skematik *Decoder*, Logika Pensaklaran dan PWM Generator.

Sebelum *gating signal* masuk ke inverter, terlebih dahulu *gating signal* akan dibandingkan dengan sinyal *hall* dan EMF. Terdapat dua keadaan sinyal *hall* pada saat proses komutasi motor yaitu dengan jumlah adalah 2 dan 1. Pada saat jumlah sinyal *hall* bernilai 2 maka keluaran dari *switch* yang menuju bagian atas inverter (Q1, Q3, dan Q5) pada pembanding adalah bernilai 1 apabila hasil dari hubungan perkalian dari

gating signal dan EMF bernilai positif. Kemudian untuk *switch* yang menuju bagian bawah inverter (Q2, Q4, dan Q6) akan bernilai 1 apabila sinyal EMF adalah bernilai negatif. Lalu pada saat jumlah sinyal hall bernilai 1 maka keluaran dari *switch* yang menuju bagian bawah inverter pada pembanding adalah *gating signal* yang bernilai 1 apabila hasil dari hubungan perkalian antara *gating signal* dan EMF adalah bernilai negatif. Kemudian untuk *switch* yang menuju bagian atas inverter akan bernilai 1 apabila EMF bernilai positif.



Gambar 3. 5 Proses Komutasi pada Motor BLDC



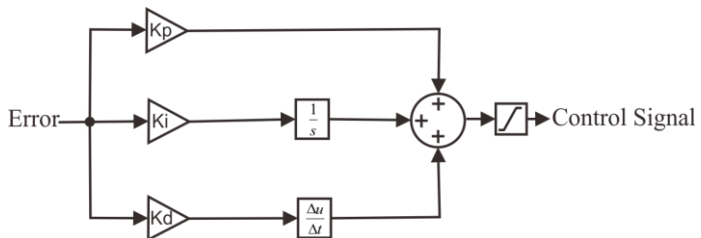
Gambar 3. 6 Rangkaian Inverter Full Bridge.

Gating signal yang menuju sisi atas inverter pada gambar 3.5 adalah tercacah menjadi 1/6 periode fundamental dan dengan nilai *duty cycle* tertentu yang besarnya diatur oleh sinyal kontrol keluaran kontroler. Begitu juga *gating signal* yang menuju sisi bawah inverter adalah memiliki periode yang sama dengan *gating signal* yang menuju sisi atas inverter.

3.6 Kontroler

3.6.1 PID

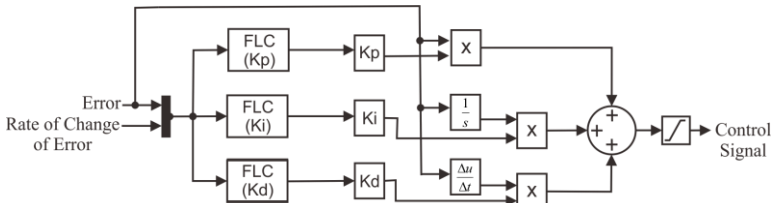
Sebelum mendesain kontroler ANFIS, terlebih dahulu akan didesain kontroler berbasis PID dan *Fuzzy*-PID. Kontroler PID mempunyai satu *input* yaitu *error* kecepatan dan satu *output* yaitu *duty cycle*. Parameter K_p , K_i , dan K_d didapatkan dengan *metode trial and error*. Dan didapatkan nilai untuk K_p , K_i , dan K_d adalah 5; 0.00001; dan 1.07. Parameter tersebut dipilih dengan memperhatikan batasan-batasan yang telah ditetapkan.



Gambar 3. 7 Diagram kontroler *Fuzzy*-PID.

3.6.2 Fuzzy-PID

Kontroler *fuzzy* pada *Fuzzy-PID* akan menentukan nilai parameter K_p , K_i , K_d dari kontroler PID. Nilai K_p , K_i , dan K_d nantinya adalah berubah sesuai dengan fungsi keanggotaan dan *rule* dari kontroler *fuzzy* yang telah di desain. Kontroler *fuzzy* yang digunakan adalah tipe mamdani. Kontroler *fuzzy* yang didesain terdiri dari 3 sub-kontroler. Masing-masing sub-kontroler memiliki *input* berupa *error* dan laju perubahan *error*. Sedangkan *output* dari tiap sub-kontroler adalah nilai K_p , K_i dan K_d . Berikut adalah struktur dari kontroler *Fuzzy-PID*.



Gambar 3. 8 Diagram kontroler *Fuzzy-PID*.

Setiap *input* dan *output* dari sub-kontroler *fuzzy* mempunyai fungsi keanggotaan berupa fungsi segitiga dan untuk tiap *input* dan *output* terdiri dari 5 fungsi keanggotaan. Bentuk dari fungsi segitiga adalah tergantung dari parameter a , b , dan c dengan persamaan sebagai berikut :

$$f(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (3.1)$$

Kelima fungsi keanggotaan untuk *input* dapat dinotasikan dengan NB (*Negative Big*), NS (*Negative Small*), Z (*Zero*), PS (*Positive Small*), PB (*Positive Big*), sedangkan untuk *output* dapat dinotasikan dengan S (*Small*), M (*Medium*), B (*Big*), VB (*Very Big*), VVB (*Very-Very Big*). Jumlah aturan *fuzzy* yang digunakan untuk setiap sub-kontroler adalah merupakan hasil perkalian dari setiap *fuzzy set* yang diwakili oleh fungsi keanggotaan yang telah didefinisikan sebelumnya, sehingga akan terdapat $5 \times 5 = 25$ aturan inferensi *fuzzy*. Aturan inferensi *fuzzy* yang digunakan digunakan pada penelitian ini adalah ditunjukkan pada tabel 3. 1 – 3. 3.

Tabel 3. 1 Aturan Inferensi *Fuzzy* untuk Kp.

e/Δe	NB	NS	Z	PS	PB
NB	VVB	VVB	VVB	VB	B
NS	VVB	VVB	VB	VB	B
Z	VB	VB	B	M	M
PS	B	M	M	M	M
PB	M	M	S	S	S

Tabel 3. 2 Aturan Inferensi *Fuzzy* untuk Ki.

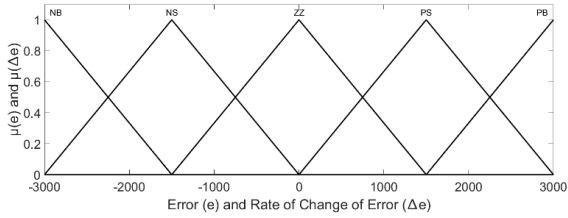
e/Δe	NB	NS	Z	PS	PB
NB	VVB	VB	B	B	B
NS	VVB	VB	VB	B	M
Z	B	M	S	S	S
PS	B	B	M	S	S
PB	M	S	S	S	S

Tabel 3. 3 Aturan Inferensi *Fuzzy* untuk Kd.

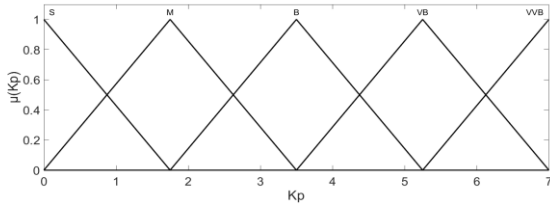
e/Δe	NB	NS	Z	PS	PB
NB	S	S	M	M	VB
NS	S	S	S	S	M
Z	S	S	S	M	VB
PS	M	M	M	VB	S
PB	S	S	S	M	VB

Tiap aturan *fuzzy* dihubungkan dengan operator min serta metode defuzzifikasi yang digunakan adalah *centroid*.

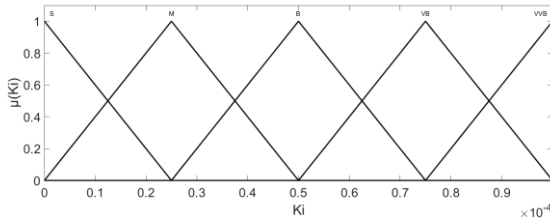
Untuk tiap sub-kontroler masing-masing *input* yang terdiri dari *error* dan laju perubahan *error* terdiri fungsi keanggotaan dengan *range* dari -3000 hingga 3000. Sedangkan untuk *output* tiap sub-kontroler yaitu nilai Kp, Ki, dan Kd masing-masing adalah memiliki *range* dari 0 sampai 7, 0 sampai 0.0001, dan 0 sampai 1.5. *Range* output sub-kontroler tersebut ditentukan mengacu pada nilai Kp, Ki, Kd kontroler PID, sehingga dipilih *range* yang besarnya tidak terlalu berbeda dengan kontroler PID dan respon yang dihasilkan adalah memenuhi batasan yang ada yaitu dipilih sedemikian rupa sehingga respon percepatan dari motor tidak terlalu cepat sehingga arus *transient* yang ditimbulkan tidak melebihi 500 A.



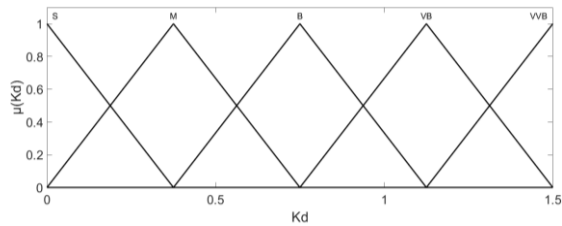
(a)



(b)



(c)

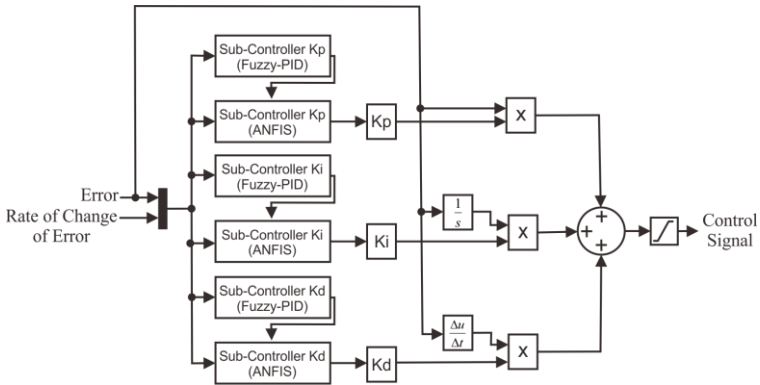


(d)

Gambar 3. 9 Fungsi Keanggotaan dari (a) *Input* tiap Sub-kontroler. (b) *Output* Sub-kontroler K_p , (c) *Output* Sub-kontroler K_i , (d) *Output* Sub-kontroler K_d .

3.6.3 ANFIS

Struktur kontroler ANFIS adalah sama seperti FLC pada kontroler *Fuzzy*-PID yaitu terdiri dari 3 sub-kontroler yang memiliki 2 *input* yaitu *error* dan laju perubahan *error*. Lalu keluaran untuk masing-masing sub-kontroler adalah nilai K_p , K_i , dan K_d . FLC awal akan dibentuk dengan menerapkan algoritma *grid partition* pada data *input error* dan laju perubahan *error*. FLC tersebut nantinya akan dilatih secara *offline*. Data *output* yang didapat dari FLC pada *Fuzzy*-PID akan didapatkan terlebih dahulu dengan memasukkan seluruh data *input* yang telah dipilih. Kemudian FLC atau FIS (*Fuzzy Inference System*) yang telah terbentuk akan dilatih dengan menggunakan algoritma ANFIS.

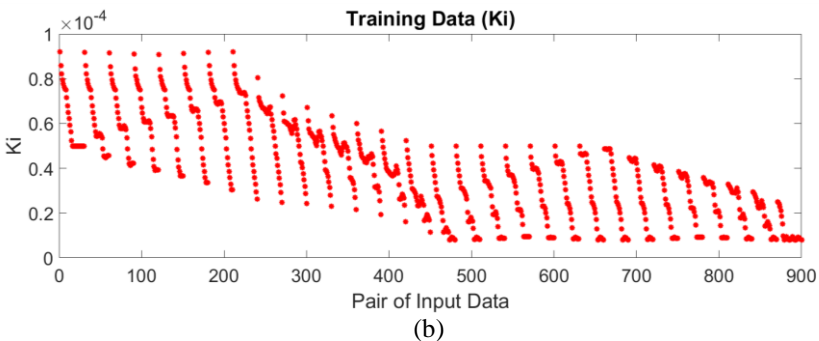
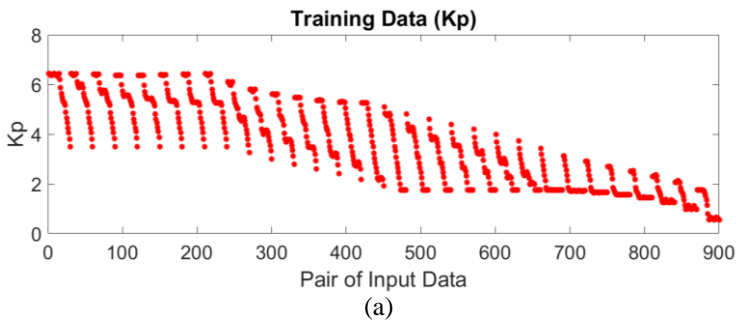


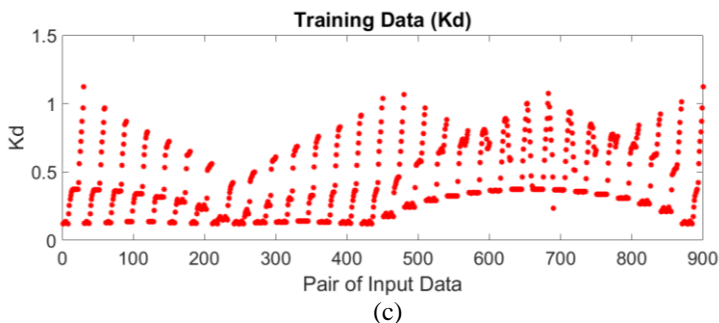
Gambar 3. 10 Struktur Kontroler ANFIS.

Langkah awal dalam perencanaan kontroler ANFIS adalah dimulai dengan mendapatkan pasang data *input*. Data *input* untuk *error* (e) dan laju perubahan *error* (Δe) didapatkan dengan metode *interval linear*. Dengan menetapkan *range* nilai untuk *error* dan $\Delta error$ adalah -3000 hingga 3000 lalu membagi menjadi 30 bagian, maka akan didapatkan 900 data *input*. Lalu data *input* tersebut akan dikombinasikan dengan data *output* dari kontroler *Fuzzy*-PID sebagai supervisi dari ANFIS. Data *output* kontroler *Fuzzy*-PID didapatkan dengan memasukkan data *input* kepada sub-kontroler K_p , K_i , dan K_d lalu data *output* yang didapatkan dikombinasikan dengan data *input*. Pasang data *input* dan *output* yang telah didapatkan nantinya akan digunakan sebagai *training data* untuk melatih parameter-parameter dari FIS (*Fuzzy*

Inference System) jenis Takagi Sugeno yang telah dibentuk terlebih dahulu.

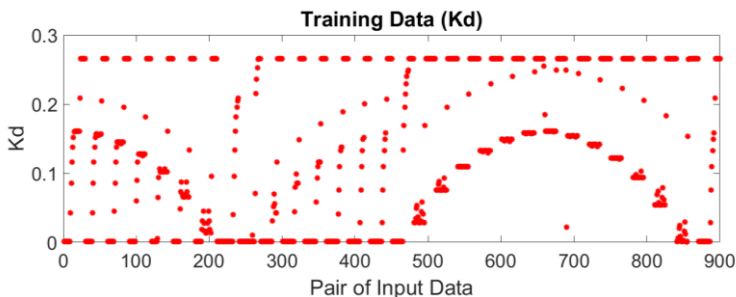
Untuk memberntuk FIS yang nantinya akan dilatih dengan *training data* yang telah didapatkan, digunakan metode *grid partition*. FIS dibentuk dengan menggunakan fungsi *genfis* pada MATLAB. Untuk sub kontroler Kp, Ki, dan Kd memiliki masing-masing untuk *input* adalah 2 fungsi keanggotaan berupa fungsi *gauss*. Pada FIS tiap sub-kontroler akan terdapat $2 \times 2 = 4$ aturan inferensi *fuzzy* dengan masing – masing *rule* memiliki *output* berupa fungsi linear yang memiliki niali awal adalah 0. FIS Tagaki Sugeno yang telah terbentuk tersebut masing-masing akan dilatih dengan algoritam *hybrid* ANFIS secara *offline*. Berikut adalah *training data* yang didapatkan sebelum dimodifikasi :





Gambar 3. 11 *Training Data* untuk (a) Sub-Kontroler K_p , (b) Sub-Kontroler K_i (c), Sub-Kontroler K_d Sebelum dilakukan Modifikasi.

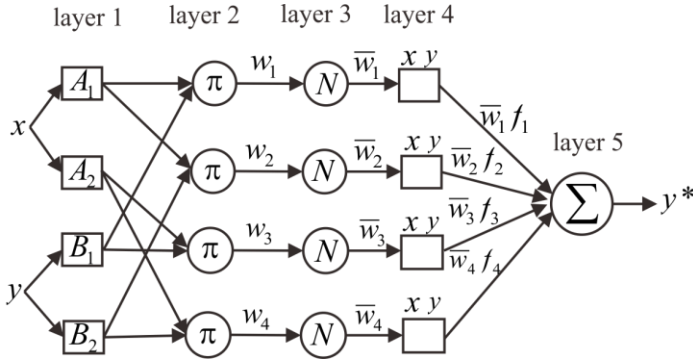
Kemudian dilakukan modifikasi pada *training data* untuk sub-kontroler K_d . Modifikasi dilakukan dikarenakan pada saat mendesain kontroler PID nilai K_d adalah paling berpengaruh pada respon *transient* dari sistem. Oleh karena itu modifikasi dilakukan dengan cara membatasi nilai K_d hingga tidak melebihi 0,266.



Gambar 3. 12 *Training Data* untuk Sub-Kontroler K_d Setelah dilakukan Modifikasi.

Parameter yang dilatih pada FIS yang telah terbentuk adalah parameter permis dan parameter konsekuen. Fungsi *anfis* pada matlab digunakan dalam melakukan *training* parameter FIS. Pada ANFIS digunakan algoritma pembelajaran *hybrid* yaitu gabungan antara algoritma *backpropagation* dan RLSE. Pada *forward pass* dari algoritma pembelajaran *hybrid*, *output* dari *node* bergerak maju sampai

layer 4 dan parameter konsekuen diidentifikasi dengan algoritma RLSE. Pada saat *backward pass*, sinyal yang bergerak mundur adalah sinyal *error* antara *output* dari *training data* dan sinyal keluaran ANFIS. Parameter premis dilatih menggunakan algoritma *backpropagation*. Untuk algoritma pembelajaran ANFIS pada sub-kontroler Kp, Ki, kd yaitu dengan 2 *input* dan satu *output*, maka perhitungan untuk setiap *nodenya* dan algoritma pembelajaran ANFIS adalah sebagai berikut :



Gambar 3. 13 Struktur Pelatihan ANFIS.

3.6.3.1 Perhitungan Tiap Layer ANFIS

Tiap FIS yang telah terbentuk sebelumnya memiliki dua *input* x (*error*) dan y (*laju perubahan error*). Dan untuk *fuzzy set input error* (A) dan *laju perubahan error* (B) memiliki 2 fungsi keanggotaan yang diwakili oleh label linguistik *Small* (S) dan *Big* (B). Kemudian memiliki *output* berupa fungsi linear z . Model FIS Tagaki Sugeno tersebut dapat dituliskan :

Rule 1 : if x is A_1 and y is B_1 then $z = f_1 = a_0^1 + a_1^1 x a_2^1 y$

Rule 2 : if x is A_1 and y is B_2 then $z = f_2 = a_0^2 + a_1^2 x a_2^2 y$

Rule 3 : if x is A_2 and y is B_1 then $z = f_3 = a_0^3 + a_1^3 x a_2^3 y$

Rule 4 : if x is A_2 and y is B_2 then $z = f_4 = a_0^4 + a_1^4 x a_2^4 y$

- **Layer 1**

Semua *node* pada layer 1 adalah *node* adaptif dengan persamaan

:

$$O_{1,i} = A_i(x), \text{ untuk } i=1,2 \quad (3.2)$$

$$O_{1,i} = B_{i-2}(y), \text{ untuk } i=3,4 \quad (3.3)$$

X dan y adalah *input* menuju *node* ke i, lalu $A_i(x)$ dan $B_{i-2}(y)$ adalah label *linguistic* yang mewakili label *Small* (S) dan *Big* (S). Sehingga $O_{1,i}$ adalah derajat keanggotaan dari *fuzzy set*. Fungsi keanggotaan untuk A dan B adalah sebuah fungsi *gauss* dengan persamaan :

$$A_i(x) = e^{\frac{-(x-b_i)^2}{2c_i^2}}, \text{ untuk } i=1,2 \quad (3.4)$$

$$B_{i-2}(y) = e^{\frac{-(y-b_i)^2}{2c_i^2}}, \text{ untuk } i=3,4 \quad (3.5)$$

Dimana $\{b_i \text{ dan } c_i\}$ adalah *parameter set*. Sejalan dengan perubahan parameter ini akan menyebabkanl variasi dari fungsi keanggotaan untuk *input* A (error) dan B (laju perubahan *error*). Parameter pada layer ini disebut sebagai parameter premis.

- **Layer 2**

Semua *node* pada layer ini adalah *node* tetap, dengan *output* dari tiap *node* adalah hasil perkalian dari seluruh sinyal yang masuk.

$$O_{2,i} = w_i = A_{\sqrt{i}}(x), B_{\sqrt{i}}(y), \text{ untuk } i=1,4 \quad (3.6)$$

$$O_{2,i} = w_i = A_{i-1}(x) B_i(y), \text{ untuk } i=2 \quad (3.7)$$

$$O_{2,i} = w_i = A_{i-1}(x) B_{i-2}(y), \text{ untuk } i=3 \quad (3.8)$$

Tiap *node* merepresentasikan *firing strength* dari *rule*. Pada umunya, operator lain dari *t-norm* yang merupakan operator *AND* dalam logika *fuzzy* dapat digunakan sebagai fungsi dalam *node* di layer ini.

- **Layer 3**

Semua *node* pada layer ini adalah *node* tetap. *Node* ke i menghitung rasio dari *rule* ke i *fire strength* dengan jumlah dari seluruh *fire strength*.

$$O_{3,i} = \hat{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, \text{ untuk } i=1,2,3,4 \quad (3.9)$$

Output dari layer ini adalah sebagai *normalized firing strengths*.

- **Layer 4**

Setiap *node* ke i pada layer ini adalah *node* yag bersifat adaptatif dengan fungsi.

$$O_{4,i} = \hat{w}_i f_i = \hat{w}_i (a_0^i + a_1^i x + a_2^i y), \text{ untuk } i=1,2,3,4 \quad (3.10)$$

Dimana \hat{w}_i adalah *normalized firing strength* dari layer 3 dan $\{(a_0^i, a_1^i, a_2^i)\}$ adalah parameter set dari *node* ini. Parameter pada layer ini disebut sebagai parameter konsekuen.

- **Layer 5**

Node tunggal pada layer ini adalah *node* tetap yang akan menghitung seluruh jumlah *output* dari sinyal yang masuk.

$$O_5 = \sum_1^i \hat{w}_i f_i = \frac{\sum_1^i w_i f_i}{\sum_1^i w_i}, \text{ untuk } i=1,2,3,4 \quad (3.11)$$

3.6.3.2 Pembelajaran Algoritma Hybrid ANFIS

Output layer 5 dari struktur ANFIS dapat ditulis menjadi :

$$y^* = \frac{w_1}{w_1+w_2} f_1 + \frac{w_2}{w_1+w_2} f_2 + \frac{w_2}{w_1+w_2} f_2 + \frac{w_2}{w_1+w_2} f_2 \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} &= \hat{w}_1 (a_0^1 + a_1^1 x + a_2^1 y) + \hat{w}_2 (a_0^2 + a_1^2 x + a_2^2 y) \\ &\quad + \hat{w}_3 (a_0^3 + a_1^3 x + a_2^3 y) + \hat{w}_4 (a_0^4 + a_1^4 x + a_2^4 y) \\ &= (\hat{w}_1) a_0^1 + (\hat{w}_1 x) a_1^1 + (\hat{w}_1 y) a_2^1 + (\hat{w}_2) a_0^2 + (\hat{w}_2 x) a_1^2 + \\ &\quad (\hat{w}_2 y) a_2^2 + (\hat{w}_3) a_0^3 + (\hat{w}_3 x) a_1^3 + (\hat{w}_3 y) a_2^3 + (\hat{w}_4) a_0^4 + \\ &\quad (\hat{w}_4 x) a_1^4 + (\hat{w}_4 y) a_2^4 \end{aligned} \quad (3.13)$$

Dengan $a_0^1, a_1^1, a_2^1, a_0^2, a_1^2, a_2^2, a_0^3, a_1^3, a_2^3, a_0^4, a_1^4, a_2^4$ adalah bersifat linear. Parameter tersebut dapat ditentukan nilainya dengan menyelesaikan batasan dalam persamaan simultan :

$$\begin{bmatrix} \hat{w}_1^{(1)} & \hat{w}_1^{(1)} x^{(1)} & \hat{w}_1^{(1)} y^{(1)} & \hat{w}_2^{(1)} & \hat{w}_2^{(1)} x^{(1)} & \hat{w}_2^{(1)} y^{(1)} \\ \hat{w}_1^{(2)} & \hat{w}_1^{(2)} x^{(2)} & \hat{w}_1^{(2)} y^{(2)} & \hat{w}_2^{(2)} & \hat{w}_2^{(2)} x^{(2)} & \hat{w}_2^{(2)} y^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \hat{w}_1^{(900)} & \hat{w}_1^{(900)} x^{(n)} & \hat{w}_1^{(900)} y^{(n)} & \hat{w}_2^{(900)} & \hat{w}_2^{(900)} x^{(900)} & \hat{w}_2^{(900)} y^{(900)} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \hat{w}_1^{(1)} & \hat{w}_1^{(1)} x^{(1)} & \hat{w}_1^{(1)} y^{(1)} & \hat{w}_2^{(1)} & \hat{w}_2^{(1)} x^{(1)} & \hat{w}_2^{(1)} y^{(1)} \\ \hat{w}_1^{(2)} & \hat{w}_1^{(2)} x^{(2)} & \hat{w}_1^{(2)} y^{(2)} & \hat{w}_2^{(2)} & \hat{w}_2^{(2)} x^{(2)} & \hat{w}_2^{(2)} y^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \hat{w}_1^{(900)} & \hat{w}_1^{(900)} x^{(n)} & \hat{w}_1^{(900)} y^{(900)} & \hat{w}_2^{(900)} & \hat{w}_2^{(900)} x^{(900)} & \hat{w}_2^{(900)} y^{(900)} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} a_0^1 \\ a_1^1 \\ a_2^1 \\ \vdots \\ a_2^4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d^{(1)} \\ d^{(2)} \\ \vdots \\ d^{(900)} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Dimana $[(x^{(k)}, y^{(k)}), d^{(k)}]$ adalah pasang *training data* ke k dengan $k=1,2, \dots, 900$ dan $\hat{w}_1^{(k)}, \hat{w}_2^{(k)}, \hat{w}_3^{(k)}, \hat{w}_4^{(k)}$ adalah *output* dari layer 3 dengan *input* $(x^{(k)}, y^{(k)})$. Persamaan (3.10) dapat dituliskan dalam vektor matriks :

$$Ax=d \quad (3.15)$$

Dimana $x=[a_0^1, a_1^1, a_2^1, a_0^2, a_1^2, a_2^2, a_0^3, a_1^3, a_2^3, a_0^4, a_1^4, a_2^4]^T$, $d=[d^1, d^2, \dots, d^{900}]^T$ dan A adalah matriks yang terbentuk dari elemen $\hat{w}_1^{(k)}, \hat{w}_2^{(k)}, \hat{w}_3^{(k)}, \hat{w}_4^{(k)}$ $x^{(k)}, y^{(k)}$. Untuk menyelesaikan persamaan (3.15) sehingga didapatkan parameter konsekuen adalah jika $A^T A$ *nonsingular*, maka persamaan tersebut dapat diselesaikan dengan menggunakan metoda *pseudoinverse* sehingga :

$$x^* = (A^T A)^{-1} A^T d \quad (3.16)$$

Baris dari matriks A dan elemen matriks d didapatkan dengan sekuensial karenanya nilai x pada persamaan (3.15) akan ditentukan dengan algoritma *Recursive Least Square Estimation* yang bersifat berulang. Dengan vektor baris ke j matriks A yang didefinisikan persamaan (3.15) adalah a_j dan elemen ke j dari d adalah $d^{(j)}$, sehingga x^* yang mengandung parameter konsekuen dapat dihitung secara *recursive* :

$$x_{j+1} = x_j + S_{j+1} a_{j+1}^T (d^{(j+1)} - a_{j+1} x_j) \quad (3.17)$$

$$S_{j+1} = S_j - \frac{S_j a_{j+1}^T a_{j+1} S_j}{1 + a_{j+1}^T S_j a_{j+1}}, \text{ untuk } j=0,1,\dots,900-1 \quad (3.18)$$

$$x^* = x_{900} \quad (3.19)$$

Dengan kondisi awal $x_0 = 0$, $S_0 = \gamma I$. Konstanta γ adalah bilangan positif yang nilainya besar dan I adalah matriks identitas. Lalu untuk *update* parameter premise dilakukan dengan algoritma *backpropagation*.

Error dari *training data* ke k adalah dapat dinyatakan dengan :

$$\begin{aligned}
E_k &= E_k(a_0^1, a_1^1, a_2^1, a_0^2, a_1^2, a_2^2, a_0^3, a_1^3, a_2^3, a_0^4, a_1^4, a_2^4, \\
&\quad b_1, b_2, c_1, c_2, b_3, b_4, c_3, c_4) \\
&= \frac{1}{2} (O_k^5(a_0^1, a_1^1, a_2^1, a_0^2, a_1^2, a_2^2, a_0^3, a_1^3, a_2^3, a_0^4, a_1^4, a_2^4 - \\
&\quad a_2^4 b_1, b_2, c_1, c_2, b_3, b_4, c_3, c_2) - d^k)^2 \quad (3.20)
\end{aligned}$$

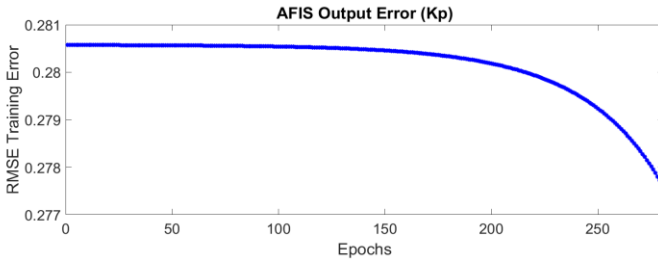
Dimana O_k^5 adalah *output* dari FIS berdasarkan data pasang *input* $(x^{(k)}, y^{(k)})$, dan $d^{(k)}$ adalah *output* yang diinginkan. Lalu algoritma *back propagation* digunakan untuk *update* parameter premis data ke *i* fuzzy rule.

$$b_i(t+1) = b_i(t) - \eta \frac{\partial E^k}{\partial b_i}, \text{ untuk } i=1,2,3,4 \quad (3.21)$$

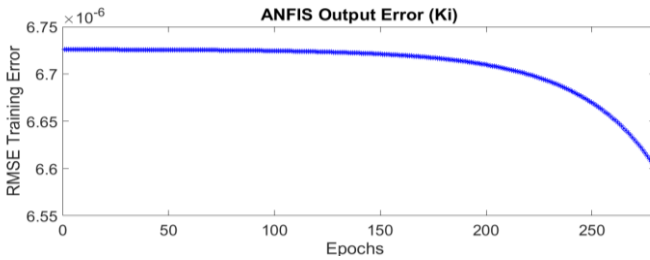
$$c_i(t+1) = c_i(t) - \eta \frac{\partial E^k}{\partial c_i}, \text{ untuk } i=1,2,3,4 \quad (3.22)$$

Dimana $\eta > 0$, $k=1,2,\dots,900$, t adalah indeks dari banyaknya iterasi dalam perbaikan yang dalam percobaan ini

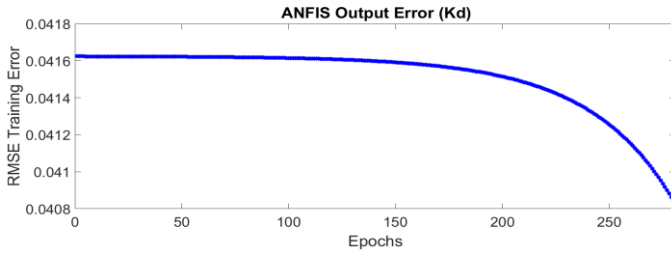
Training parameter FIS dilakukan sebanyak $t = 1,2,\dots,280$ iterasi dan berikut adalah nilai *error* RMS untuk tiap iterasi dari algoritma ANFIS :



(a)



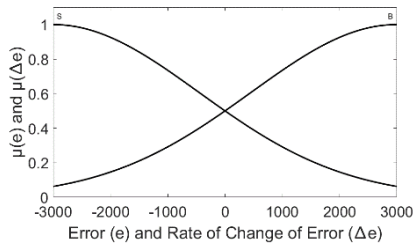
(b)



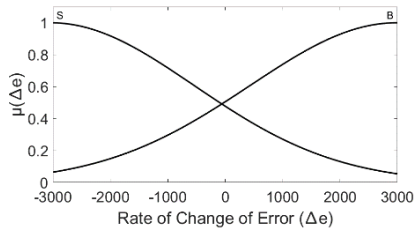
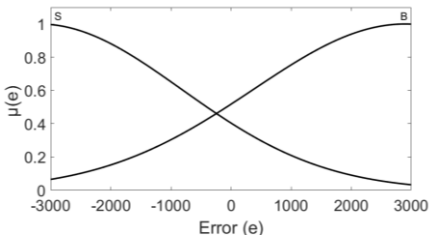
(c)

Gambar 3. 14 *Root Mean Square Error* pada Pelatihan ANFIS untuk (a) Sub-Kontroler Kp, (b) Sub-Kontroler Ki, (c) Sub-Kontroler Kd.

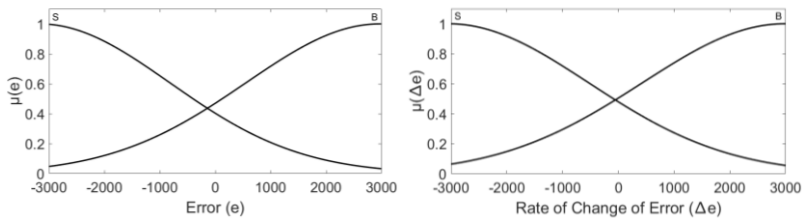
Kemudian hasil parameter premis dari ANFIS adalah :



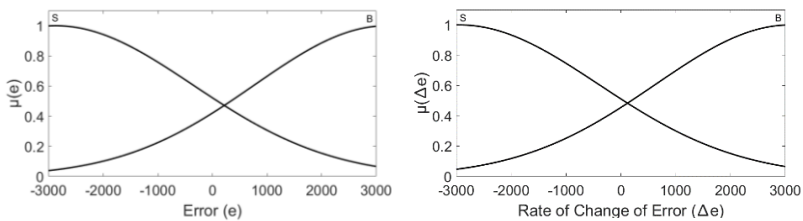
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 3. 15 (a) Parameter Premis Sebelum Dilatih, Hasil Parameter Premis dari Pelatihan ANFIS untuk (b) Sub-Kontroler Kp, (c) Sub-Kontroler Ki, (d) Sub-Kontroler Kd.

Sementara untuk parameter konsekuen adalah :

Tabel 3. 4 Parameter Konsekuen Sub-Kontroler Kp Hasil Pelatihan ANFIS.

	Sub-kontroler Kp			
	R1	R2	R3	R4
a_0	0,00026	-0,00035	-0,00052	0,00006
a_1	-0,00042	-0,00088	-0,00028	0,00018
a_2	5,992	6,026	2,656	0,6169

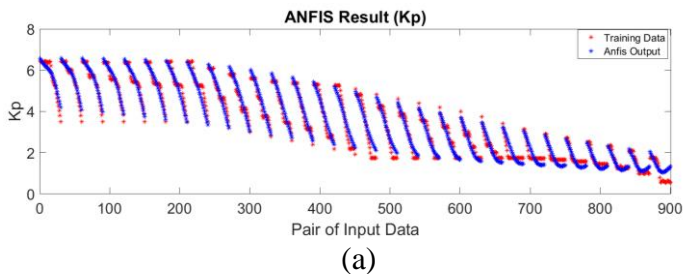
Tabel 3. 5 Parameter Konsekuensi Sub-Kontroler Ki Hasil Pelatihan ANFIS.

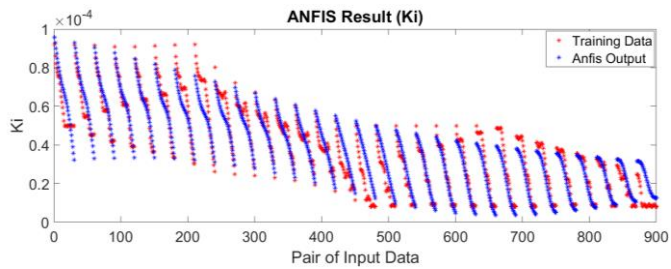
	Sub-kontroler Ki			
	R1	R2	R3	R4
a_0	-1,3e-08	8,6e-09	-5,8e-09	1,3e-08
a_1	-1,8e-08	-1,9e-08	3,1e-09	2,7e-09
a_2	2,4e-06	0,00012	6,1e-05	-3,9e-05

Tabel 3. 6 Parameter Konsekuensi Sub-Kontroler Kd Hasil Pelatihan ANFIS.

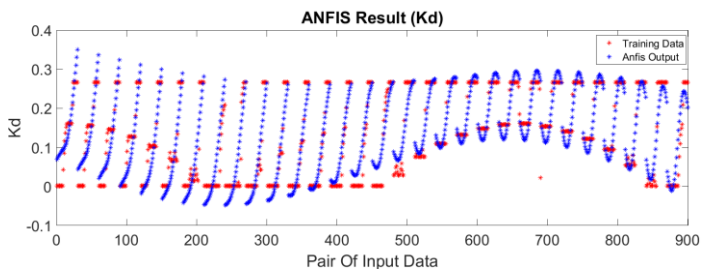
	Sub-kontroler Kd			
	R1	R2	R3	R4
a_0	-0,00018	-7,8e-05	-0,00022	-8,1e-05
a_1	3,5e-05	0,00010	-0,00012	-0,00013
a_2	-0,4117	-0,2125	0,366	0,9281

Hasil FIS yang telah dilatih dengan algoritma ANFIS kemudian diberi masukan data *input* yang telah dipilih, kemudian *outputnya* akan dibandingkan dengan data *ouptut* yang diinginkan. Hasil dari perbandingan *output* ANFIS dan *output training data* adalah sebagai berikut :





(b)



(c)

Gambar 3. 16 Hasil Perbandingan *Output* ANFIS dan *Training Data* untuk (a) Sub-Kontroler Kp, (b) Sub-Kontroler Ki, (c) Sub-Kontroler Kd.

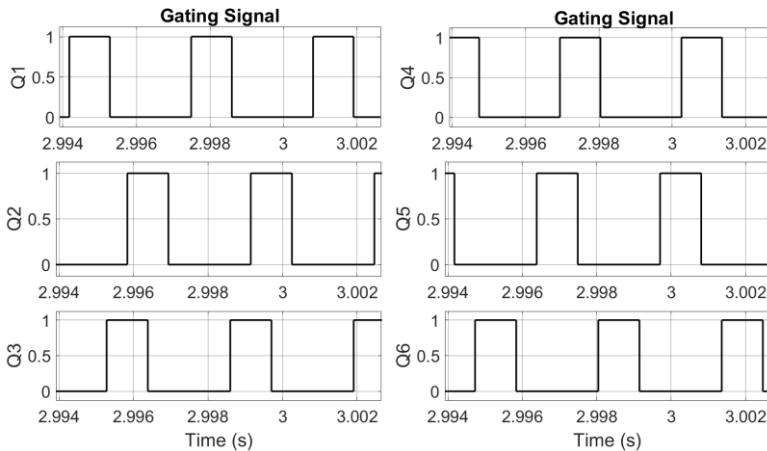
BAB 4

HASIL SIMULASI DAN PEMBAHASAN

Pengujian dilakukan dengan cara melakukan simulasi dari model SIMULINK yang telah didesain pada MATLAB. Selanjutnya akan dianalisis dan dibandingkan respon dari sistem kontrol kecepatan motor dengan menggunakan metode PID, *Fuzzy*-PID, dan ANFIS.

4.1 Simulasi *Open Loop* Sistem Kontrol Kecepatan Motor BLDC

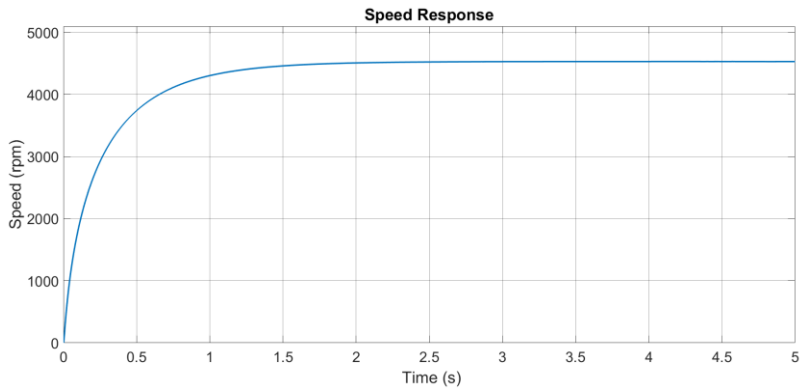
Pengujian *Open loop* dilakukan untuk mengetahui bagaimana respon dari sistem pengaturan kecepatan motor sebelum diberi kontroler. Simulasi dilakukan dengan cara memberikan *input* bernilai 1 pada sinyal kontrol yang mengatur besarnya *duty cycle*. Berikut adalah bentuk *gating* signal yang dihasilkan :



Gambar 4. 1 *Gating Signal* Pada Saat *Open Loop* (Pada Kondisi *Steady state*).

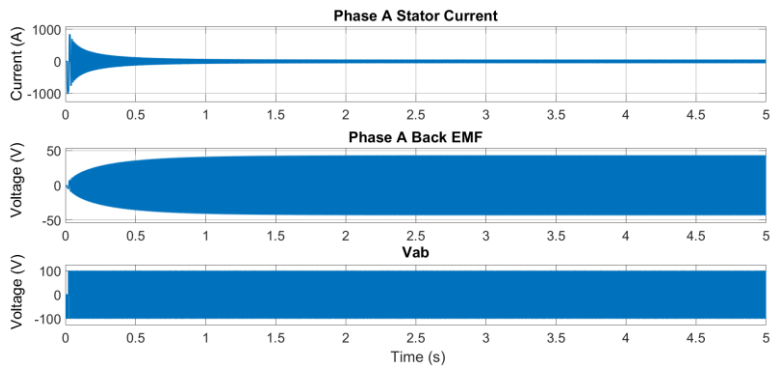
Nilai 1 mengindikasikan IGBT adalah dalam kondisi berkonduksi dan nilai 0 tidak berkonduksi. Dengan memberi *input duty cycle* = 1, maka waktu konduksi dari IGBT pada inverter adalah tidak tercacah, sehingga nilai tegangan yang muncul pada fasa stator yang terhubung dengan IGBT

dengan keadaan konduksi adalah konstan sebesar 100 V. Kemudian akan dianalisis respon kecepatan dari motor :

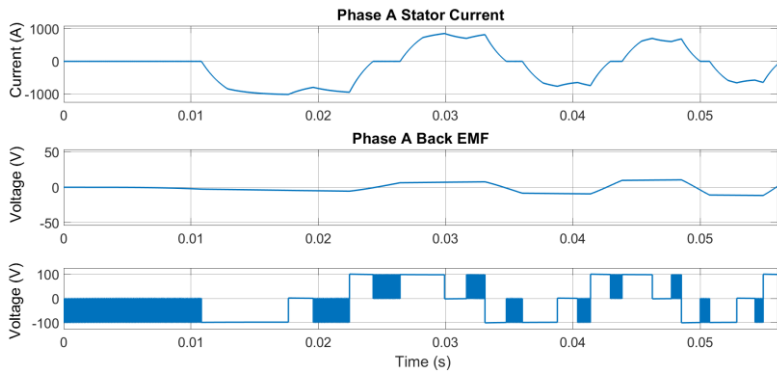


Gambar 4. 2 Respon Kecepatan pada Saat *Open Loop*

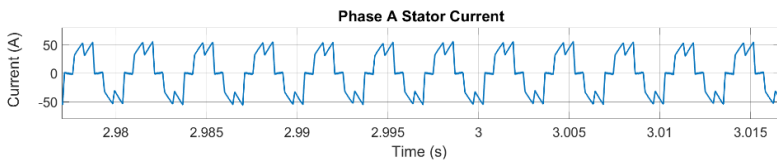
Pada gambar 4.2 didapatkan hasil yaitu kecepatan *steady state* dari motor BLDC adalah memiliki nilai rata-rata sebesar 4528,58 rpm, *rise time* 0,70 detik dan *time constan* 0,24 detik. Kemudian berikut adalah grafik arus dan *back emf* pada fasa A, tegangan antara fasa A dan B ,arus DC, dan torsi elektromagnetik :



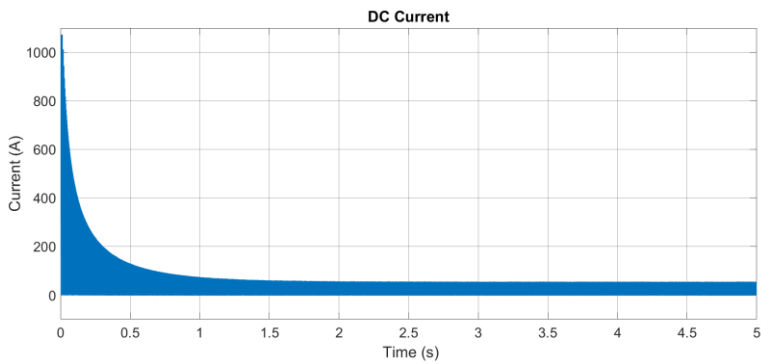
(a)



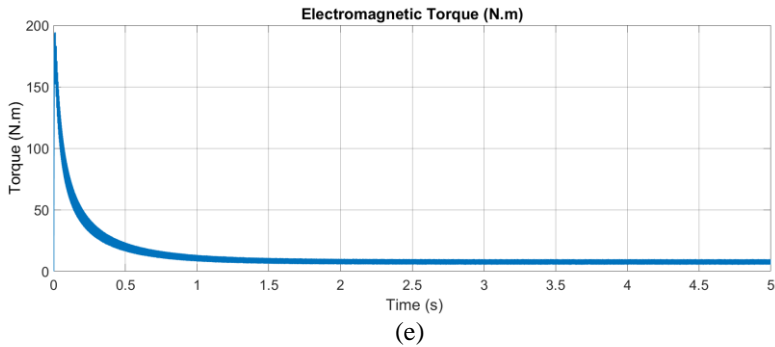
(b)



(c)



(d)



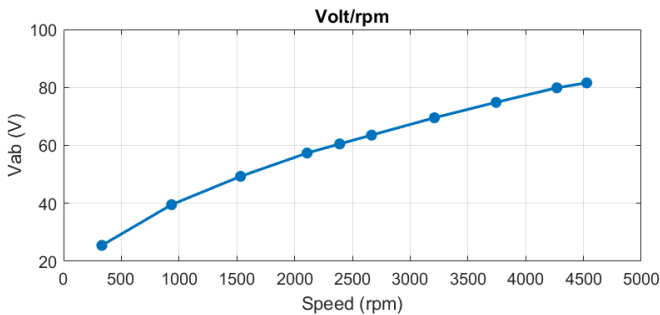
Gambar 4. 3 (a) Respon Arus dan *Back EMF* pada Fasa A Kumparan Stator, Serta Tegangan antar Fasa A dan B, (b) Respon Arus dan *Back EMF* pada Fasa A Kumparan Stator, Serta Tegangan antar Fasa A dan B pada Keadaan *Transient*, (c) Respon Arus pada Fasa A saat *Steady State*, (d) Arus DC pada Inverter, (e) Torsi Elektromagnetik.

Pada saat *steady state* nilai rms dari arus pada fasa A adalah 34,8 A. Pada saat kondisi *starting* terlihat bahwa baik arus pada fasa A stator maupun arus DC pada inverter nilainya adalah sangat besar yaitu hingga mencapai 1013 A dan 1073 A. Hal tersebut dapat terjadi karena pada saat kondisi *starting* belum terdapat induksi *back-emf* dari magnet permanen pada tiap fasa stator dan IGBT berkonduksi dengan tidak tercacah, sehingga tegangan antar fasa stator adalah bernilai maksimal. Tegangan yang bernilai maksimal tersebut dapat memunculkan arus pada fasa stator yang nilainya sangat besar. Akibat dari arus yang besar maka akan menghasilkan torsi elektromagnetik dan percepatan yang besar hingga mencapai 194,1 N.m dan 3282 rad/s². Oleh karena itu pada sistem kontrol PID, *Fuzzy-PID*, dan ANFIS akan didesain sehingga pada saat kondisi *starting* atau terjadi perubahan kecepatan besar tegangan pada fasa stator adalah tidak menyebabkan arus *transient* melebihi 500 A.

Kemudian dengan merubah nilai *duty cycle* maka akan didapatkan variasi nilai RMS tegangan antar fasa. Berikut adalah nilai RMS dari tegangan V_{ab} pada keadaan *steady state* dan kecepatan aktual dari motor :

Tabel 4. 1 Nilai Tegangan Vab dan Kecepatan Aktual Motor

Vab (V)	Kecepatan (rpm)
81,56	4528,4
79,87	4269,7
74,85	3743,5
69,52	3209,6
63,54	2665,7
60,5	2390,2
57,35	2108
49,3	1531,9
39,54	934,9
25,47	331,5



Gambar 4. 4 Kurva Tegangan dan Kecepatan

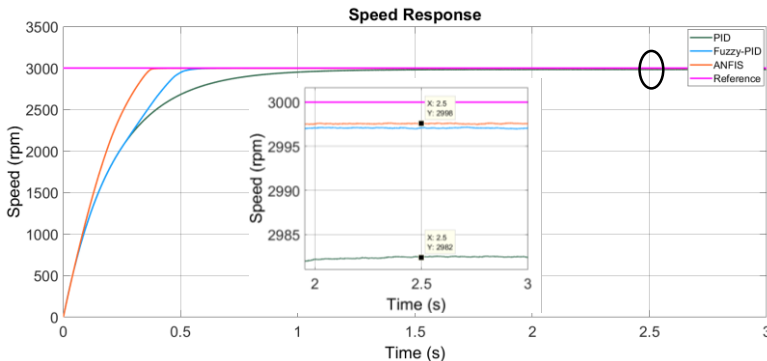
Terlihat dari gambar 4.4 bahwa semakin besar tegangan pada fasa motor BLDC maka akan semakin besar kecepatan aktual dari motor.

4.2 Simulasi Sistem Kontrol kecepatan Motor BLDC dengan metode PID, *Fuzzy*-PID, dan ANFIS

Sistem kontrol PID, *Fuzzy*-PID, dan ANFIS yang sudah didesain sebelumnya kemudian akan disimulasikan pada beberapa kondisi dari variasi kecepatan referensi dan beban. Kemudian akan akan dibandingkan antara sistem kontrol PID, *Fuzzy*-PID, ANFIS dan dianalisis sistem kontrol mana yang memiliki respon paling baik.

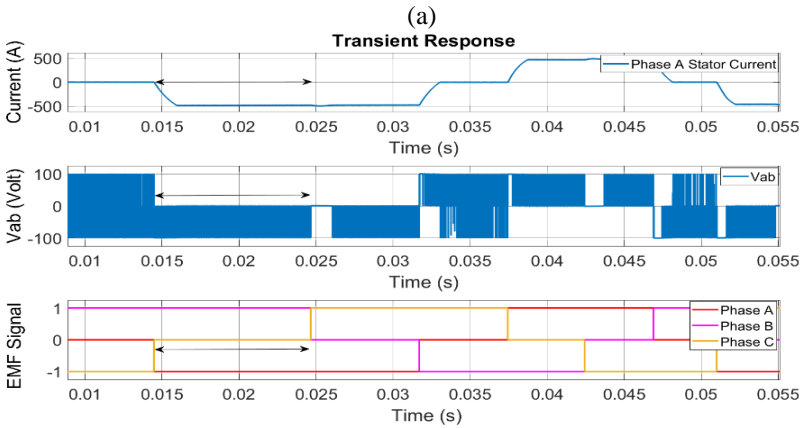
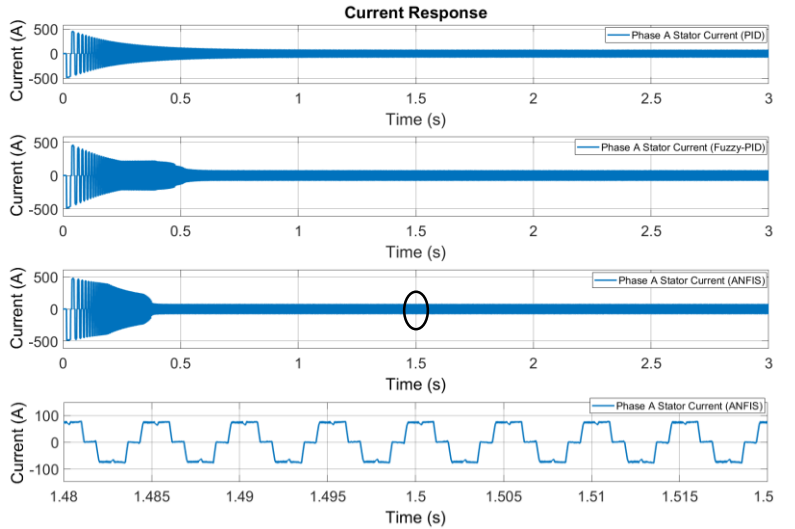
4.2.1 Simulasi dengan Kecepatan Referensi Tetap dan Berbeban

Pada kondisi ini akan diatur besar kecepatan referensi dan torsi beban sebesar 3000 rpm dan 8 N.m pada saat $t=0$. Nilai tersebut adalah nilai maksimal perubahan kecepatan yang dapat terjadi pada batasan yang ditentukan yaitu dari 0 hingga 3000 rpm. Keadaan ini adalah menjadi acuan dalam mendesain sistem kontrol sehingga nantinya arus *transient* yang timbul akibat perubahan kecepatan tidak melebihi 500 A. Berikut adalah respon kecepatan dari ketiga sistem kontrol :



Gambar 4. 5 Respon Kecepatan dengan Kecepatan Referensi Tetap dan Beban Tetap.

Berdasarkan hasil dari simulasi, sistem kontrol PID, *Fuzzy*-PID, dan ANFIS menghasilkan respon kecepatan dengan nilai pada kondisi *steady state* masing-masing adalah 2982,50 rpm, 2997,08 rpm, 2997,57 rpm. Kemudian memiliki *rise time* 0,48 detik, 0,39 detik, 0,27 detik dan *steady state error* sebesar 0,58%, 0,1%, dan 0,08%. Terlihat kontroler ANFIS menghasilkan respon kecepatan yang lebih baik dibandingkan dengan *Fuzzy*-PID dan PID.

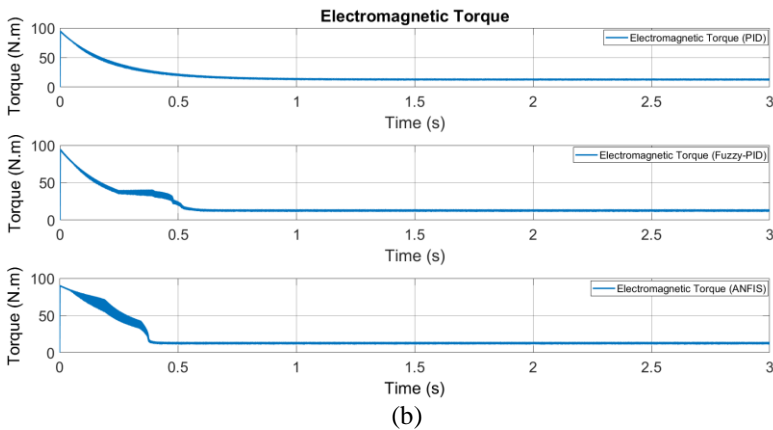


Gambar 4. 6 (a) Respon Arus pada Fasa A Kumparan Stator, (b) Respon *Transient* pada Motor.

Lalu untuk besar arus yang dihasilkan pada fasa stator adalah memiliki nilai maksimal sebesar 496,5 A, 496,4 A dan 495,8 A untuk

kontroler PID, *Fuzzy*-PID, dan ANFIS. Terlihat nilai dari *peak* arus ketiga kontroler adalah tidak ada yang melebihi 500A. Hal tersebut dikarenakan nilai tegangan antar fasa stator pada saat *starting* adalah tercacah sehingga membuat arus *starting* menjadi kecil.

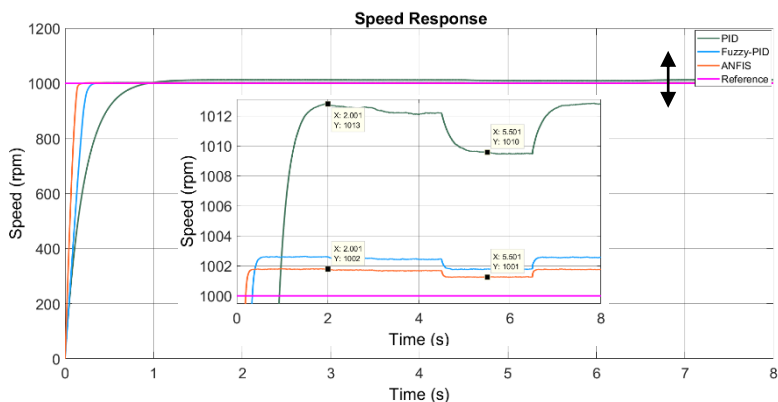
Kemudian *peak* torsi elektromagnetik yang dihasilkan pada saat *starting* untuk tiap kontroler adalah 94,96 N.m, 94.81 N.m, dan 90,66 Nm. Torsi yang dihasilkan pada saat *starting* adalah besar dikarenakan arus yang timbul pada saat *starting* adalah besar dan motor sudah terhubung dengan beban. Grafik respon torsi elektromagnetik yang dihasilkan adalah :



Gambar 4. 7 Torsi Elektromagnetik yang dihasilkan.

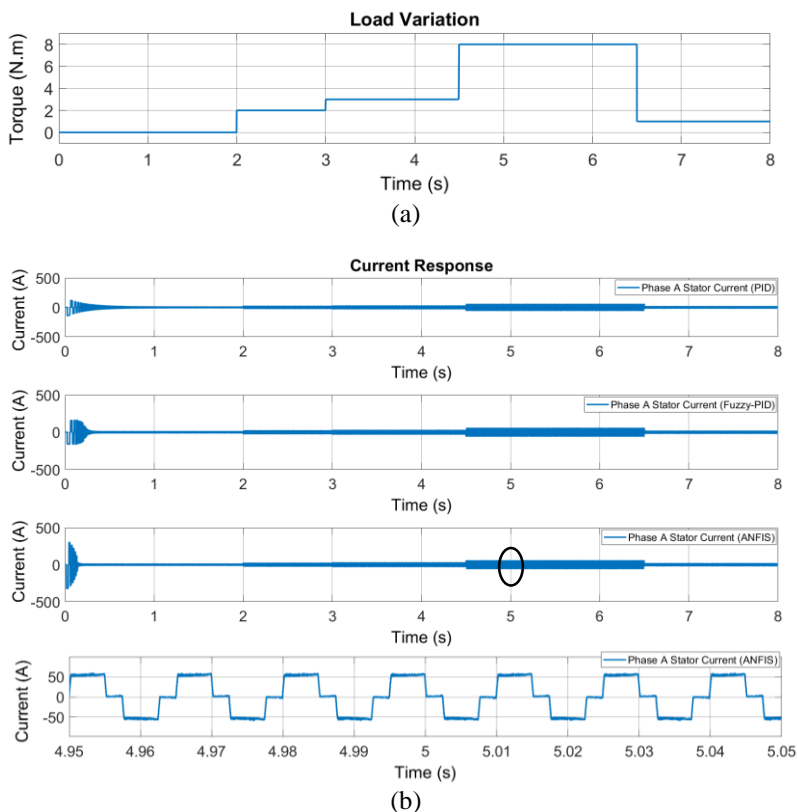
4.2.2 Simulasi dengan Kecepatan Referensi Tetap dan Beban Berubah

Pada kondisi ini, kecepatan referensi akan diatur dengan nilai konstan 1000 rpm pada saat $t=0$, lalu beban akan akan muncul pada saat $t = 2$ sebesar 2 N.m . Beban akan berubah pada $t = 3$ menjadi 3 N.m, lalu pada $t = 4,5$ menjadi 8 N.m, dan pada $t = 6,5$ menjadi 1 N.m. Berikut respon kecepatan yang dihasilkan :



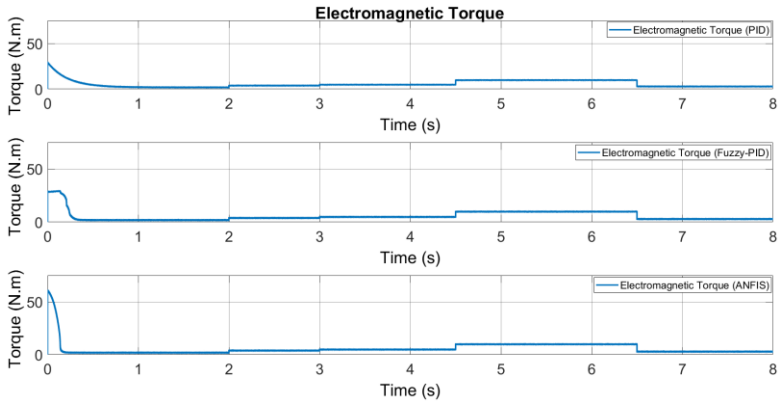
Gambar 4. 8 Respon Kecepatan dengan Kecepatan Referensi Tetap dan Beban Berubah.

Respon kecepatan kontroler PID, *Fuzzy*-PID, dan ANFIS pada saat menuju kecepatan 1000 rpm dan beban belum muncul adalah memiliki rise time 0,47 detik, 0,19 detik, 0,10 detik dan *time constant* 0,21 detik, 0,14 detik, 0,07 detik. Kecepatan *steady state* tiap kontroler yang dicapai sebelum beban muncul adalah 1012,80 rpm, 1002,60 rpm, 1001,78 rpm. Setelah beban muncul, terjadi perubahan kecepatan pada tiap sistem kontrol. Untuk kontroler PID, *Fuzzy*-PID, dan ANFIS perubahan kecepatan yang terjadi adalah pada saat $T_L = 2$ N.m adalah turun sebesar 0,03%, 0,01%, 0,01% dari kecepatan sebelum beban tersebut muncul. Untuk $T_L = 3$ N.m dan 8 N.m adalah turun sebesar 0,04%, 0,01%, 0% dan 0,26%, 0,07%, 0,04%. Lalu pada saat beban turun menjadi $T_L = 1$ N.m, kecepatan mengalami kenaikan sebesar 0,33%, 0,08%, 0,05%. Penurunan dan kenaikan kecepatan tersebut terjadi karena tidak ada skema kontrol arus pada sistem, sehingga respon arus dalam mengikuti perubahan beban adalah tidak terlalu baik dan kecepatan tidak bisa kembali ke keadaan *steady state* sebelum beban muncul. Kemudian untuk kontroler PID, *Fuzzy*-PID dan ANFIS pada kondisi beban berbeda-beda memiliki rata-rata *steady state error* adalah 1,19%, 0,24%, dan 0,16%. Terlihat kontroler ANFIS memiliki nilai *steady state error* yang paling kecil dan cenderung memiliki perubahan kecepatan yang kecil jika terjadi perubahan beban dibandingkan dengan kontroler PID dan *Fuzzy*-PID. Selanjutnya akan diamati respon arus dari motor.



Gambar 4. 9 (a) Variasi Pembebanan, (b) Respon Arus pada Fasa A Kumparan Stator .

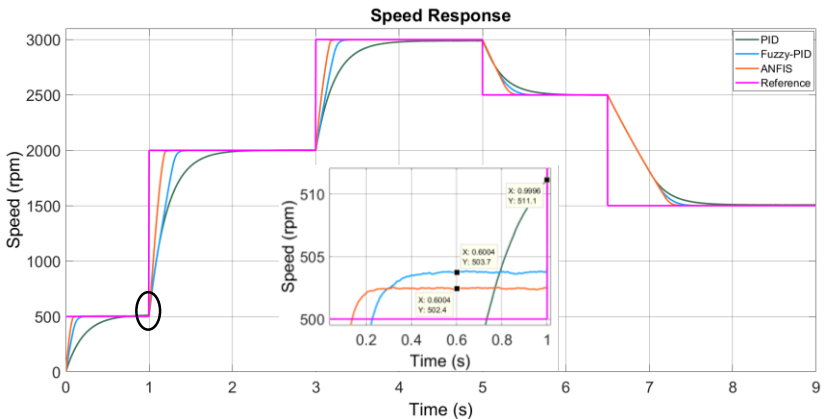
Dapat dilihat bahwa arus *transient* pada saat kondisi *starting* adalah dalam batas yang ditentukan yaitu tidak ada yang melebihi 500 A. Nilai arus tiap fasa stator akan naik apabila beban yang diberikan bertambah besar dan turun apabila beban bertambah kecil. Grafik dari torsi elektromagnetik motor adalah sebagai berikut :



Gambar 4. 10 Torsi Elektromagnetik yang dihasilkan.

4.2.3 Simulasi dengan Kecepatan Referensi Berubah dan Beban Tetap

Pada kondisi ini mulanya kecepatan referensi adalah 500 rpm pada $t = 0$, lalu berubah menjadi 2000 rpm, 3000 rpm, 2500 rpm, dan 1500 rpm pada $t = 1$, $t = 3$, $t = 5$, dan $t = 6.5$. Torsi beban yang diberikan adalah konstan sebesar 5 N.m. Berikut hasil respon kecepatan dari motor :



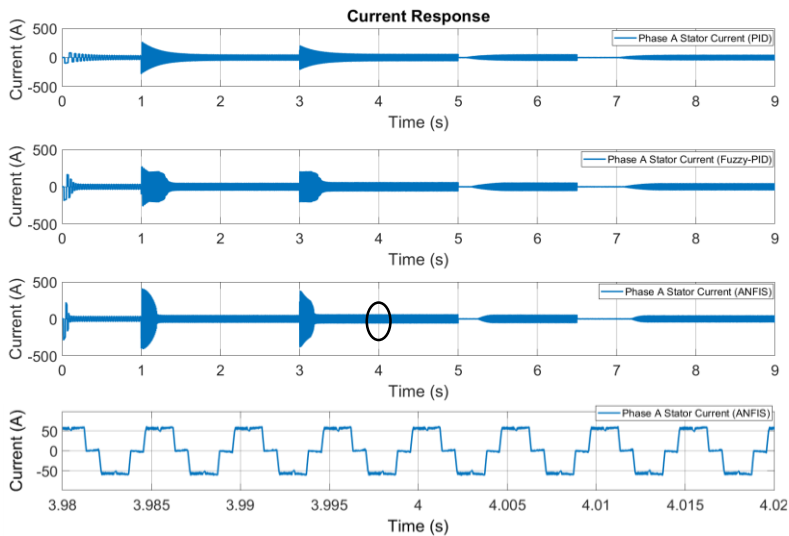
Gambar 4. 11 Respon Kecepatan dengan Kecepatan Referensi Berubah dan Beban Tetap.

Respon kecepatan pada kontroler PID memiliki nilai kecepatan aktual dan rata-rata *steady state error* yang cukup besar jika dibandingkan dengan *fuzzy*-PID dan ANFIS. Hal tersebut dapat dilihat dalam tabel 4.2

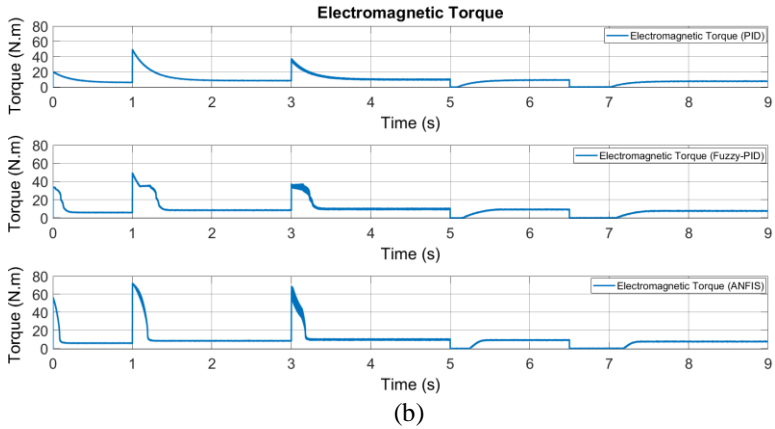
Tabel 4. 2 Nilai Kecepatan Aktual dan *Steady State Error*

	PID	<i>Fuzzy</i> -PID	ANFIS
Kecepatan Aktual (Kec. Reff = 500 rpm)	515,50 rpm	503,71 rpm	502,47 rpm
Kecepatan Aktual (Kec. Reff = 2000 rpm)	2002,22 rpm	2000,26 rpm	2000,19 rpm
Kecepatan Aktual (Kec. Reff = 3000 rpm)	2988,65 rpm	2998,03 rpm	2998,35 rpm
Kecepatan Aktual (Kec. Reff = 2500 rpm)	2497,49 rpm	2499,45 rpm	2499,52 rpm
Kecepatan Aktual (Kec. Reff = 1500 rpm)	1507,04 rpm	1501,19 rpm	1500,86 rpm
Rata- Rata <i>Steady State Error</i>	0,83%	0,18%	0,13%

Untuk grafik arus dan torsi elektromagnetik dari sistem adalah :



(a)



Gambar 4. 12 (a) Respon Arus pada Fasa A Kumpanan Stator, (b)Torsi Elektromagnetik yang dihasilkan.

Besar arus *transient* yang muncul saat terjadi perubahan kecepatan adalah sesuai dengan batasan yang ditetapkan yaitu tidak melebihi 500A. Lalu pada saat penurunan kecepatan, torsi elektromagnetik yang dihasilkan adalah bernilai 0. Kemudian torsi elektromagnetik akan naik sampai nilai tertentu hingga kecepatan mendekati kecepatan referensi.

--- halaman ini sengaja dikosongkan ---

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian dan simulasi yang sudah dilakukan maka didapatkan kesimpulan :

1. Respon kecepatan kontroler ANFIS yang telah didesain pada kondisi berbeban konstan dengan nilai $T_L = 8$ N.m dan kecepatan 3000 rpm adalah memiliki *rise time* 0,27 detik dengan *steady state error* 0,08%. Sementara untuk kontroler PID dan Fuzzy-PID memiliki respon dengan *rise time* 0,48 detik dan 0,39 detik serta *steady state error* 0,58 % dan 0,1 %. Kontroler ANFIS mampu menghasilkan respon kecepatan yang lebih baik pada dibanding dengan PID dan Fuzzy-PID pada kondisi kecepatan referensi tetap dan beban konstan.
2. Pada saat motor berputar dengan kecepatan konstan 1000 rpm dan beban berubah mulai dari saat tidak berbeban hingga $T_L = 8$ N.m kontroler ANFIS menghasilkan nilai rata-rata *steady state error* sebesar 0.16%, sementara untuk kontroler PID dan Fuzzy-PID adalah 1,19% dan 0,24%. Hal tersebut mengindikasikan bahwa kontroler ANFIS cenderung mempertahankan kecepatannya pada saat terjadi perubahan beban sehingga memiliki *steady state error* lebih kecil jika dibandingkan dengan PID dan Fuzzy-PID.
3. Apabila kecepatan referensi bervariasi dengan *range* 0 - 3000 rpm dan beban tetap sebesar $T_L = 5$ N.m, respon kecepatan dari kontroler ANFIS adalah memiliki nilai rata-rata *error steady state* setiap perubahan beban adalah sebesar 0,13 %. Sedangkan untuk PID dan Fuzzy-PID adalah 0,83% dan 0,18%. Apabila terjadi perubahan kecepatan referensi, kontroler ANFIS mampu mengikuti perubahan kecepatan yang baru dengan lebih baik dibanding dengan PID dan Fuzzy-PID.
4. Hasil respon kecepatan dari kontroler Fuzzy-PID adalah lebih baik dibanding dengan PID karena pada Fuzzy-PID parameter K_p , K_i , dan K_d adalah berubah mengikuti perubahan beban dan kecepatan referensi. Kemudian hasil respon kecepatan pada kontroler ANFIS adalah lebih baik dibanding dengan Fuzzy-PID karena FLC pada kontroler ANFIS yang mengatur nilai dari parameter K_p , K_i , dan K_d sudah dilatih dengan mengacu pada *training data* yang telah

dimodifikasi sehingga menghasilkan keluaran yang mampu membuat respon kecepatan dari motor menjadi lebih baik.

5. Metode kontrol tegangan pada motor BLDC dengan menggunakan PWM adalah memiliki struktur yang simpel karena hanya memerlukan dua umpan balik pada sistem kontrolnya yaitu kecepatan aktual dan sinyal *hall*.

5.2 Saran

Dari simulasi yang telah dilakukan maka penulis mempunyai saran agar nantinya akan terus berkembang sistem kontrol untuk motor BLDC terutama pada kendaraan GESITS yaitu :

1. Memberikan kontrol arus pada sistem pengaturan kecepatan motor sehingga arus pada saat *starting* dapat terbatas dan menjadi kecil.
2. Menerapkan Algoritma kecerdasan buatan yang lain dalam proses *training* ANFIS agar dapat menghasilkan FIS dengan nilai *ouput* lebih mendekati *training data*.

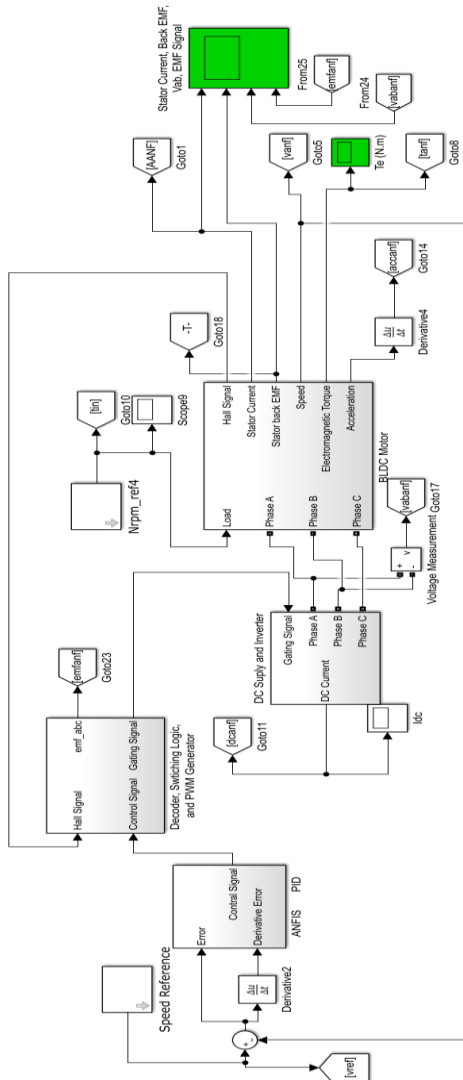
DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. N. Ansari dan S. L, "Speed Control of BLDC Motor for Electric Vehicle," *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 3, pp. 1666 - 1671, 2014.
- [2] J. Zhao dan Y. Yu. 2011, *Brushless DC Motor Fundamentals*.
- [3] L. Yen-Shin, S. Fu-San, dan C. Yung-Hsin, "Novel Loss Reduction Pulsewidth Modulation Technique for Brushless DC Motor Drives Fed by MOSFET Inverter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, pp. 1646-1652, 2004.
- [4] M. A. Shamseldin dan A. A. E.-. Samahy, "Speed Control of BLDC Motor by Using PID Control and Self-Tuning Fuzzy PID Controller," in *15th International Workshop on Research and Education in Mechatronics (REM)*, 2014, pp. 1-9.
- [5] R. Arulmozhiyal dan R. Kandiban, "Design of Fuzzy PID Controller for Brushless DC Motor," in *2012 International Conference on Computer Communication and Informatics*, 2012, pp. 1-7.
- [6] M. Ridwan, "Rancang Bangun Sistem Kontrol Kecepatan Motor BLDC Menggunakan ANFIS untuk Aplikasi Sepeda motor Listrik," *Teknik Elektro*, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2017.
- [7] K. Premkumar dan B. V. Manikandan, "Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System based Speed Controller for Brushless DC Motor," *ELSEVIER Neurocomputing*, vol. 138, pp. 260-270, 2014.
- [8] J. S. R. Jang, "ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 23, pp. 665-685, 1993.
- [9] X. Gao. 2013, *BLDC Motor Control with Hall Sensors Based on FRDM-KE02Z Application Note*.
- [10] C.-L. Xia, *Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives and Controls*: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2012.
- [11] P. Yedamale dan M. T. Inc. 2003, *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*. 20.
- [12] H. Mohan, R. K. P, dan G. S, "Speed Control of Brushless DC Motor Using Fuzzy Based Controllers," *IRJET*, vol. 2, pp. 875-881, 2015.

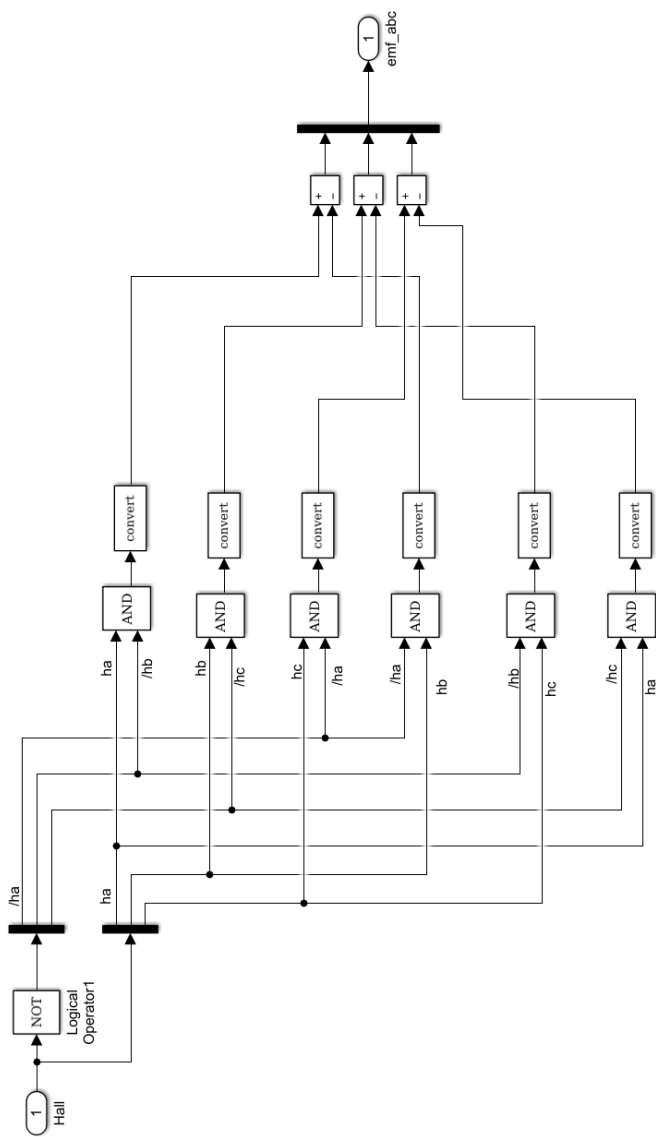
- [13] Hartono, "Optimization of Tsukamoto Fuzzy Inference System using Fuzzy Grid Partition," *International Journal of Computer Science and Network*, vol. 5, p. 6, 5 October 2016 2016.
- [14] K. Premkumar dan B. V. Manikandan, "Speed Control of Brushless DC Motor using Bat Algorithm Optimized Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System," *ELSEVIER Applied Soft Computing*, vol. 32, pp. 403-419, 2015.
- [15] A. T. Wahyudi, "Desain dan Simulasi Kontrol Kecepatan Motor BLDC menggunakan Metode *Fuzzy - PID Controller* untuk Aplikasi Sepeda Motor Listrik," Bachelor, Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2018.

LAMPIRAN

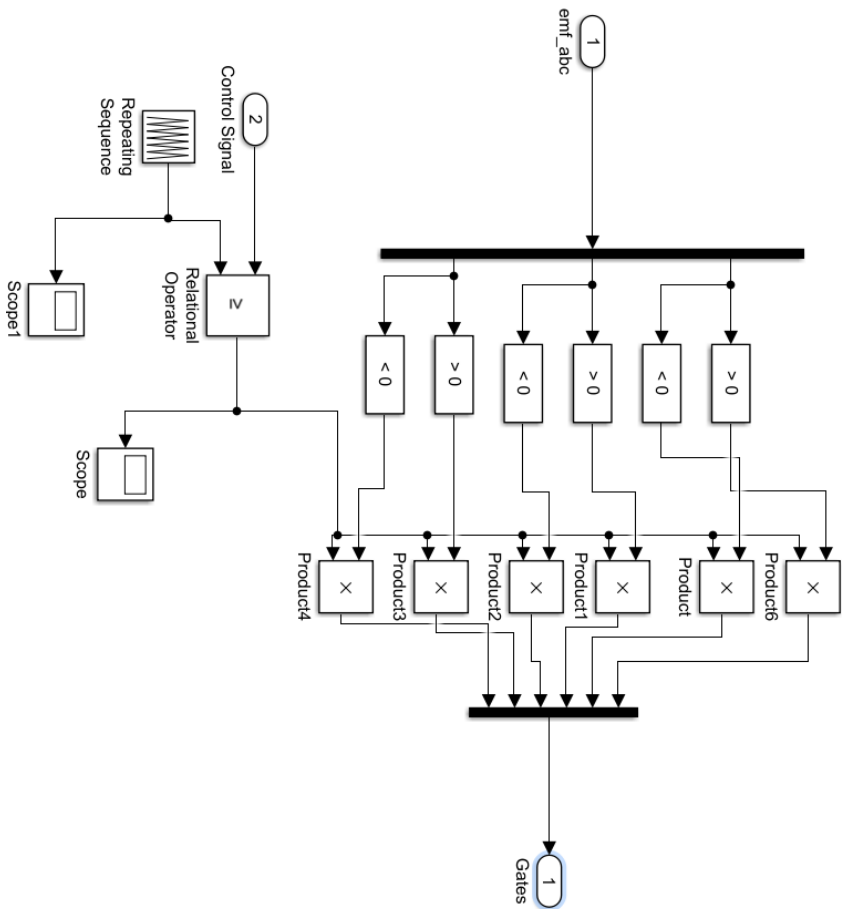
1. Skematik Sistem Secara Keseluruhan



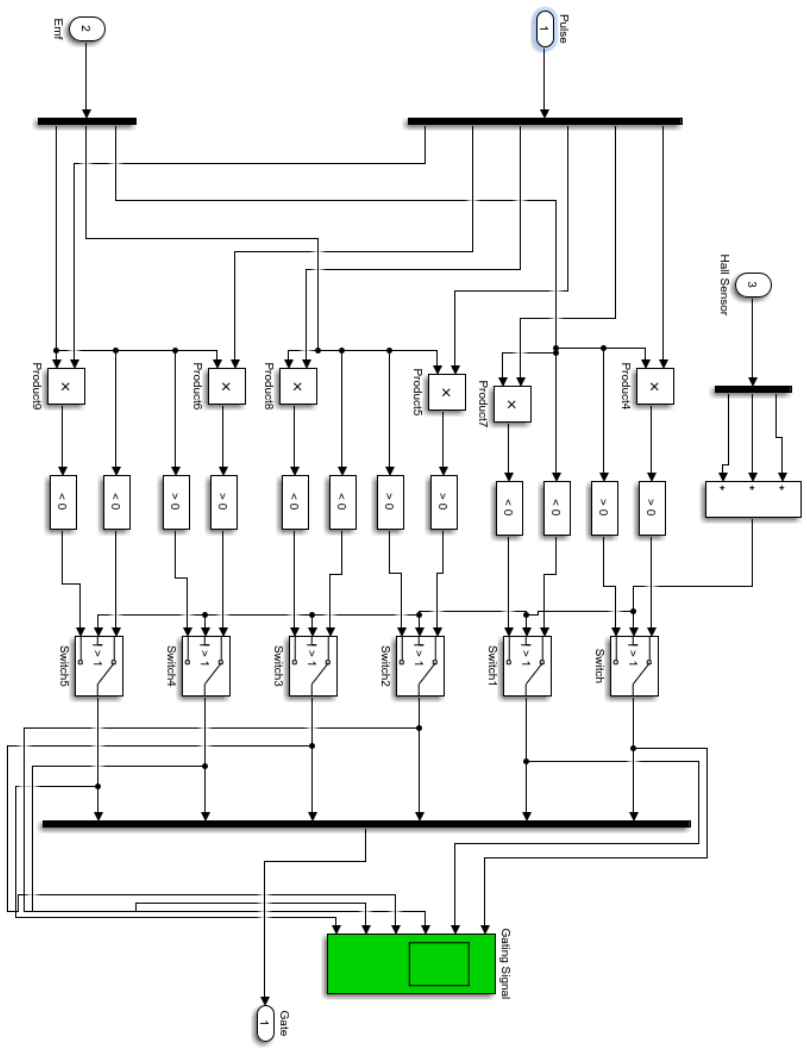
2. Skematik *Decoder*



3. Skematik Logika Pensaklaran dan PWM



4. Skematik Pemandang



5. Training Data

Nomor	Error	$\Delta Error$	Kp	Ki	Kd
1	-3000	-3000	6,44	9,20E-05	0,001
2	-3000	-2793,1	6,427718	8,59E-05	0,001
3	-3000	-2586,21	6,401352	8,21E-05	0,001
4	-3000	-2379,31	6,364696	7,95E-05	0,001
5	-3000	-2172,41	6,354257	7,76E-05	0,001
6	-3000	-1965,52	6,393007	7,63E-05	0,001
7	-3000	-1758,62	6,422288	7,54E-05	0,001
8	-3000	-1551,72	6,438511	7,50E-05	0,001
9	-3000	-1344,83	6,432282	7,16E-05	0,001
10	-3000	-1137,93	6,409073	6,80E-05	0,042236
11	-3000	-931,034	6,374649	6,49E-05	0,085308
12	-3000	-724,138	6,343352	6,22E-05	0,115825
13	-3000	-517,241	6,384095	5,93E-05	0,137353
14	-3000	-310,345	6,416055	5,62E-05	0,151761
15	-3000	-103,448	6,435907	5,24E-05	0,159547
16	-3000	103,4483	6,200558	5,00E-05	0,161
17	-3000	310,3448	5,867553	5,00E-05	0,161
18	-3000	517,2414	5,646996	5,00E-05	0,161
19	-3000	724,1379	5,492006	5,00E-05	0,161
20	-3000	931,0345	5,382176	5,00E-05	0,161
21	-3000	1137,931	5,306858	5,00E-05	0,161
22	-3000	1344,828	5,263061	5,00E-05	0,161
23	-3000	1551,724	5,163551	5,00E-05	0,208542
24	-3000	1758,621	4,876841	5,00E-05	0,266
25	-3000	1965,517	4,64845	5,00E-05	0,266
26	-3000	2172,414	4,447584	5,00E-05	0,266
27	-3000	2379,31	4,253553	5,00E-05	0,266
28	-3000	2586,207	4,048027	5,00E-05	0,266

Nomor	Error	$\Delta Error$	Kp	Ki	Kd
29	-3000	2793,103	3,808514	5,00E-05	0,266
30	-3000	3000	3,5	5,00E-05	0,266
31	-2793,1	-3000	6,427718	9,18E-05	0,001
32	-2793,1	-2793,1	6,427718	8,59E-05	0,001
33	-2793,1	-2586,21	6,401352	8,21E-05	0,001
34	-2793,1	-2379,31	6,364696	7,95E-05	0,001
35	-2793,1	-2172,41	6,354257	7,76E-05	0,001
36	-2793,1	-1965,52	6,393007	7,63E-05	0,001
37	-2793,1	-1758,62	6,422288	7,54E-05	0,001
38	-2793,1	-1551,72	6,427718	7,50E-05	0,001
39	-2793,1	-1344,83	6,096043	7,15E-05	0,001
40	-2793,1	-1137,93	5,98665	6,80E-05	0,042236
41	-2793,1	-931,034	5,927023	6,49E-05	0,085308
42	-2793,1	-724,138	5,864688	6,22E-05	0,115825
43	-2793,1	-517,241	5,944247	5,93E-05	0,137353
44	-2793,1	-310,345	5,997675	5,62E-05	0,151761
45	-2793,1	-103,448	6,015393	5,44E-05	0,156453
46	-2793,1	103,4483	6,015393	5,44E-05	0,156453
47	-2793,1	310,3448	5,867553	5,45E-05	0,156342
48	-2793,1	517,2414	5,646996	5,48E-05	0,155945
49	-2793,1	724,1379	5,492006	5,54E-05	0,155206
50	-2793,1	931,0345	5,382176	5,50E-05	0,155799
51	-2793,1	1137,931	5,306858	5,46E-05	0,156268
52	-2793,1	1344,828	5,263171	5,35E-05	0,156453
53	-2793,1	1551,724	5,162015	4,87E-05	0,204535
54	-2793,1	1758,621	4,876841	4,56E-05	0,266
55	-2793,1	1965,517	4,64845	4,53E-05	0,266
56	-2793,1	2172,414	4,447584	4,47E-05	0,266
57	-2793,1	2379,31	4,253553	4,49E-05	0,266

Nomor	Error	$\Delta Error$	Kp	Ki	Kd
58	-2793,1	2586,207	4,048027	4,54E-05	0,266
59	-2793,1	2793,103	3,808514	4,56E-05	0,266
60	-2793,1	3000	3,5	4,56E-05	0,266
61	-2586,21	-3000	6,401352	9,14E-05	0,001
62	-2586,21	-2793,1	6,401352	8,53E-05	0,001
63	-2586,21	-2586,21	6,401352	8,21E-05	0,001
64	-2586,21	-2379,31	6,364696	7,95E-05	0,001
65	-2586,21	-2172,41	6,354257	7,76E-05	0,001
66	-2586,21	-1965,52	6,393007	7,63E-05	0,001
67	-2586,21	-1758,62	6,401352	7,55E-05	0,001
68	-2586,21	-1551,72	6,401352	7,50E-05	0,001
69	-2586,21	-1344,83	6,056549	7,14E-05	0,001
70	-2586,21	-1137,93	5,790973	6,79E-05	0,045077
71	-2586,21	-931,034	5,697531	6,49E-05	0,085308
72	-2586,21	-724,138	5,632096	6,22E-05	0,115825
73	-2586,21	-517,241	5,715646	5,93E-05	0,137353
74	-2586,21	-310,345	5,746921	5,78E-05	0,145418
75	-2586,21	-103,448	5,746921	5,78E-05	0,145418
76	-2586,21	103,4483	5,746921	5,78E-05	0,145418
77	-2586,21	310,3448	5,746921	5,78E-05	0,145418
78	-2586,21	517,2414	5,646996	5,81E-05	0,144693
79	-2586,21	724,1379	5,492006	5,90E-05	0,142402
80	-2586,21	931,0345	5,382176	5,83E-05	0,14424
81	-2586,21	1137,931	5,307923	5,71E-05	0,145418
82	-2586,21	1344,828	5,263974	5,36E-05	0,145418
83	-2586,21	1551,724	5,156797	4,87E-05	0,195412
84	-2586,21	1758,621	4,861121	4,44E-05	0,266
85	-2586,21	1965,517	4,64845	4,20E-05	0,266
86	-2586,21	2172,414	4,447584	4,13E-05	0,266

Nomor	Error	$\Delta Error$	Kp	Ki	Kd
87	-2586,21	2379,31	4,253553	4,15E-05	0,266
88	-2586,21	2586,207	4,048027	4,22E-05	0,266
89	-2586,21	2793,103	3,825027	4,22E-05	0,266
90	-2586,21	3000	3,5	4,22E-05	0,266
91	-2379,31	-3000	6,364696	9,09E-05	0,001
92	-2379,31	-2793,1	6,364696	8,44E-05	0,001
93	-2379,31	-2586,21	6,364696	8,11E-05	0,001
94	-2379,31	-2379,31	6,364696	7,95E-05	0,001
95	-2379,31	-2172,41	6,354257	7,76E-05	0,001
96	-2379,31	-1965,52	6,364696	7,64E-05	0,001
97	-2379,31	-1758,62	6,364696	7,55E-05	0,001
98	-2379,31	-1551,72	6,364696	7,50E-05	0,001
99	-2379,31	-1344,83	5,994211	7,10E-05	0,001526
100	-2379,31	-1137,93	5,721451	6,72E-05	0,059975
101	-2379,31	-931,034	5,584221	6,47E-05	0,089381
102	-2379,31	-724,138	5,520684	6,22E-05	0,115825
103	-2379,31	-517,241	5,563022	6,08E-05	0,127546
104	-2379,31	-310,345	5,563022	6,08E-05	0,127546
105	-2379,31	-103,448	5,563022	6,08E-05	0,127546
106	-2379,31	103,4483	5,563022	6,08E-05	0,127546
107	-2379,31	310,3448	5,563022	6,08E-05	0,127546
108	-2379,31	517,2414	5,563022	6,08E-05	0,127546
109	-2379,31	724,1379	5,492006	6,13E-05	0,125153
110	-2379,31	931,0345	5,386151	6,03E-05	0,127546
111	-2379,31	1137,931	5,314326	5,78E-05	0,127546
112	-2379,31	1344,828	5,265568	5,40E-05	0,127546
113	-2379,31	1551,724	5,146499	4,85E-05	0,181028
114	-2379,31	1758,621	4,824077	4,39E-05	0,266
115	-2379,31	1965,517	4,608842	4,08E-05	0,266

Nomor	Error	$\Delta Error$	Kp	Ki	Kd
116	-2379,31	2172,414	4,447584	3,90E-05	0,266
117	-2379,31	2379,31	4,253553	3,92E-05	0,266
118	-2379,31	2586,207	4,095341	3,92E-05	0,266
119	-2379,31	2793,103	3,857094	3,92E-05	0,266
120	-2379,31	3000	3,5	3,92E-05	0,266
121	-2172,41	-3000	6,354257	9,08E-05	0,001
122	-2172,41	-2793,1	6,354257	8,41E-05	0,001
123	-2172,41	-2586,21	6,354257	8,08E-05	0,001
124	-2172,41	-2379,31	6,354257	7,92E-05	0,001
125	-2172,41	-2172,41	6,354257	7,76E-05	0,001
126	-2172,41	-1965,52	6,354257	7,65E-05	0,001
127	-2172,41	-1758,62	6,354257	7,55E-05	0,001
128	-2172,41	-1551,72	6,354257	7,50E-05	0,001
129	-2172,41	-1344,83	5,974696	7,09E-05	0,005708
130	-2172,41	-1137,93	5,699578	6,70E-05	0,064662
131	-2172,41	-931,034	5,563474	6,45E-05	0,093827
132	-2172,41	-724,138	5,460817	6,32E-05	0,106453
133	-2172,41	-517,241	5,432287	6,35E-05	0,101848
134	-2172,41	-310,345	5,432287	6,35E-05	0,101848
135	-2172,41	-103,448	5,432287	6,35E-05	0,101848
136	-2172,41	103,4483	5,432287	6,35E-05	0,101848
137	-2172,41	310,3448	5,432287	6,35E-05	0,101848
138	-2172,41	517,2414	5,432287	6,35E-05	0,101848
139	-2172,41	724,1379	5,438932	6,28E-05	0,106453
140	-2172,41	931,0345	5,390743	6,05E-05	0,101848
141	-2172,41	1137,931	5,316615	5,80E-05	0,101848
142	-2172,41	1344,828	5,26614	5,41E-05	0,101848
143	-2172,41	1551,724	5,142819	4,85E-05	0,160887
144	-2172,41	1758,621	4,811083	4,37E-05	0,266

Nomor	Error	$\Delta Error$	Kp	Ki	Kd
145	-2172,41	1965,517	4,591715	4,06E-05	0,266
146	-2172,41	2172,414	4,447584	3,85E-05	0,266
147	-2172,41	2379,31	4,271965	3,65E-05	0,266
148	-2172,41	2586,207	4,111754	3,65E-05	0,266
149	-2172,41	2793,103	3,868389	3,65E-05	0,266
150	-2172,41	3000	3,5	3,65E-05	0,266
151	-1965,52	-3000	6,393007	9,13E-05	0,001
152	-1965,52	-2793,1	6,393007	8,51E-05	0,001
153	-1965,52	-2586,21	6,393007	8,19E-05	0,001
154	-1965,52	-2379,31	6,364696	7,95E-05	0,001
155	-1965,52	-2172,41	6,354257	7,76E-05	0,001
156	-1965,52	-1965,52	6,393007	7,63E-05	0,001
157	-1965,52	-1758,62	6,393007	7,55E-05	0,001
158	-1965,52	-1551,72	6,393007	7,50E-05	0,001
159	-1965,52	-1344,83	6,043134	7,13E-05	0,001
160	-1965,52	-1137,93	5,776093	6,77E-05	0,048266
161	-1965,52	-931,034	5,603228	6,61E-05	0,073034
162	-1965,52	-724,138	5,460817	6,53E-05	0,086893
163	-1965,52	-517,241	5,360351	6,62E-05	0,069191
164	-1965,52	-310,345	5,340554	6,64E-05	0,065701
165	-1965,52	-103,448	5,340554	6,64E-05	0,065701
166	-1965,52	103,4483	5,340554	6,64E-05	0,065701
167	-1965,52	310,3448	5,340554	6,64E-05	0,065701
168	-1965,52	517,2414	5,34275	6,57E-05	0,069191
169	-1965,52	724,1379	5,355609	6,28E-05	0,086893
170	-1965,52	931,0345	5,345296	6,01E-05	0,073034
171	-1965,52	1137,931	5,309181	5,73E-05	0,065701
172	-1965,52	1344,828	5,264287	5,37E-05	0,065701
173	-1965,52	1551,724	5,154774	4,86E-05	0,133437

Nomor	Error	$\Delta Error$	Kp	Ki	Kd
174	-1965,52	1758,621	4,853762	4,43E-05	0,266
175	-1965,52	1965,517	4,64845	4,14E-05	0,266
176	-1965,52	2172,414	4,447584	3,85E-05	0,266
177	-1965,52	2379,31	4,253553	3,58E-05	0,266
178	-1965,52	2586,207	4,057488	3,36E-05	0,266
179	-1965,52	2793,103	3,831382	3,36E-05	0,266
180	-1965,52	3000	3,5	3,36E-05	0,266
181	-1758,62	-3000	6,422288	9,17E-05	0,001
182	-1758,62	-2793,1	6,422288	8,58E-05	0,001
183	-1758,62	-2586,21	6,401352	8,21E-05	0,001
184	-1758,62	-2379,31	6,364696	7,95E-05	0,001
185	-1758,62	-2172,41	6,354257	7,76E-05	0,001
186	-1758,62	-1965,52	6,393007	7,63E-05	0,001
187	-1758,62	-1758,62	6,422288	7,54E-05	0,001
188	-1758,62	-1551,72	6,422288	7,50E-05	0,001
189	-1758,62	-1344,83	6,088244	7,15E-05	0,001
190	-1758,62	-1137,93	5,804234	6,95E-05	0,018201
191	-1758,62	-931,034	5,603228	6,91E-05	0,031383
192	-1758,62	-724,138	5,460817	6,85E-05	0,045197
193	-1758,62	-517,241	5,360351	6,92E-05	0,02757
194	-1758,62	-310,345	5,293116	6,96E-05	0,015772
195	-1758,62	-103,448	5,281239	6,97E-05	0,013665
196	-1758,62	103,4483	5,281239	6,97E-05	0,013665
197	-1758,62	310,3448	5,281654	6,88E-05	0,015772
198	-1758,62	517,2414	5,284339	6,57E-05	0,02757
199	-1758,62	724,1379	5,289318	6,28E-05	0,045197
200	-1758,62	931,0345	5,28532	6,01E-05	0,031383
201	-1758,62	1137,931	5,282158	5,70E-05	0,018201
202	-1758,62	1344,828	5,263314	5,35E-05	0,013665

Nomor	Error	$\Delta Error$	Kp	Ki	Kd
203	-1758,62	1551,724	5,161082	4,87E-05	0,095453
204	-1758,62	1758,621	4,876841	4,47E-05	0,266
205	-1758,62	1965,517	4,64845	4,14E-05	0,266
206	-1758,62	2172,414	4,447584	3,85E-05	0,266
207	-1758,62	2379,31	4,253553	3,58E-05	0,266
208	-1758,62	2586,207	4,048027	3,28E-05	0,266
209	-1758,62	2793,103	3,811479	3,03E-05	0,266
210	-1758,62	3000	3,5	3,03E-05	0,266
211	-1551,72	-3000	6,438511	9,20E-05	0,001
212	-1551,72	-2793,1	6,427718	8,59E-05	0,001
213	-1551,72	-2586,21	6,401352	8,21E-05	0,001
214	-1551,72	-2379,31	6,364696	7,95E-05	0,001
215	-1551,72	-2172,41	6,354257	7,76E-05	0,001
216	-1551,72	-1965,52	6,393007	7,63E-05	0,001
217	-1551,72	-1758,62	6,422288	7,54E-05	0,001
218	-1551,72	-1551,72	6,438511	7,50E-05	0,001
219	-1551,72	-1344,83	6,102455	7,38E-05	0,001
220	-1551,72	-1137,93	5,804234	7,37E-05	0,001
221	-1551,72	-931,034	5,603228	7,36E-05	0,001
222	-1551,72	-724,138	5,460817	7,34E-05	0,001
223	-1551,72	-517,241	5,360351	7,36E-05	0,001
224	-1551,72	-310,345	5,293116	7,37E-05	0,001
225	-1551,72	-103,448	5,256782	7,38E-05	0,001
226	-1551,72	103,4483	5,252423	7,26E-05	0,001
227	-1551,72	310,3448	5,252519	6,88E-05	0,001
228	-1551,72	517,2414	5,252736	6,57E-05	0,001
229	-1551,72	724,1379	5,253142	6,28E-05	0,001
230	-1551,72	931,0345	5,252816	6,01E-05	0,001
231	-1551,72	1137,931	5,25256	5,70E-05	0,001

Nomor	Error	$\Delta Error$	Kp	Ki	Kd
232	-1551,72	1344,828	5,252437	5,34E-05	0,001
233	-1551,72	1551,724	5,163551	4,88E-05	0,039867
234	-1551,72	1758,621	4,876841	4,47E-05	0,095453
235	-1551,72	1965,517	4,64845	4,14E-05	0,133437
236	-1551,72	2172,414	4,447584	3,85E-05	0,160887
237	-1551,72	2379,31	4,253553	3,58E-05	0,181028
238	-1551,72	2586,207	4,048027	3,28E-05	0,195412
239	-1551,72	2793,103	3,808514	2,94E-05	0,204535
240	-1551,72	3000	3,5	2,62E-05	0,208542
241	-1344,83	-3000	6,102455	8,03E-05	0,001
242	-1344,83	-2793,1	6,096043	7,15E-05	0,001
243	-1344,83	-2586,21	6,056549	7,01E-05	0,001
244	-1344,83	-2379,31	5,994211	6,90E-05	0,001
245	-1344,83	-2172,41	5,974696	6,81E-05	0,001
246	-1344,83	-1965,52	6,043134	6,74E-05	0,001
247	-1344,83	-1758,62	6,088244	6,69E-05	0,001
248	-1344,83	-1551,72	6,102455	6,68E-05	0,001
249	-1344,83	-1344,83	5,615813	6,63E-05	0,001
250	-1344,83	-1137,93	5,420066	6,60E-05	0,001
251	-1344,83	-931,034	5,279958	6,52E-05	0,001
252	-1344,83	-724,138	5,176171	6,43E-05	0,001
253	-1344,83	-517,241	5,100274	6,54E-05	0,001
254	-1344,83	-310,345	5,047912	6,61E-05	0,001
255	-1344,83	-103,448	5,017327	6,72E-05	0,001
256	-1344,83	103,4483	4,76854	6,73E-05	0,001
257	-1344,83	310,3448	4,644489	6,43E-05	0,001
258	-1344,83	517,2414	4,602039	6,16E-05	0,001
259	-1344,83	724,1379	4,526262	5,90E-05	0,010284
260	-1344,83	931,0345	4,586799	5,64E-05	0,001

Nomor	Error	$\Delta Error$	Kp	Ki	Kd
261	-1344,83	1137,931	4,636432	5,35E-05	0,001
262	-1344,83	1344,828	4,660665	4,99E-05	0,001
263	-1344,83	1551,724	4,670167	4,64E-05	0,070566
264	-1344,83	1758,621	4,552325	4,44E-05	0,215685
265	-1344,83	1965,517	4,35946	4,12E-05	0,236047
266	-1344,83	2172,414	4,181112	3,83E-05	0,252096
267	-1344,83	2379,31	4,001035	3,56E-05	0,264725
268	-1344,83	2586,207	3,803571	3,26E-05	0,266
269	-1344,83	2793,103	3,56811	2,92E-05	0,266
270	-1344,83	3000	3,260291	2,48E-05	0,266
271	-1137,93	-3000	5,804234	7,22E-05	0,001
272	-1137,93	-2793,1	5,804234	6,48E-05	0,001
273	-1137,93	-2586,21	5,790973	6,10E-05	0,001
274	-1137,93	-2379,31	5,721451	6,07E-05	0,001
275	-1137,93	-2172,41	5,699578	6,04E-05	0,001
276	-1137,93	-1965,52	5,776093	6,01E-05	0,001
277	-1137,93	-1758,62	5,804234	5,98E-05	0,001
278	-1137,93	-1551,72	5,804234	5,95E-05	0,001
279	-1137,93	-1344,83	5,420066	5,91E-05	0,001
280	-1137,93	-1137,93	5,064768	5,81E-05	0,001
281	-1137,93	-931,034	4,973749	5,70E-05	0,001
282	-1137,93	-724,138	4,902417	5,56E-05	0,001
283	-1137,93	-517,241	4,847805	5,73E-05	0,001
284	-1137,93	-310,345	4,803058	5,87E-05	0,001
285	-1137,93	-103,448	4,764887	6,15E-05	0,001
286	-1137,93	103,4483	4,547239	6,16E-05	0,001
287	-1137,93	310,3448	4,206724	5,95E-05	0,03113
288	-1137,93	517,2414	4,085623	5,74E-05	0,0518
289	-1137,93	724,1379	3,979513	5,51E-05	0,069791

Nomor	Error	$\Delta Error$	Kp	Ki	Kd
290	-1137,93	931,0345	4,063881	5,27E-05	0,055696
291	-1137,93	1137,931	4,135458	4,99E-05	0,042236
292	-1137,93	1344,828	4,157249	4,62E-05	0,042236
293	-1137,93	1551,724	4,161916	4,26E-05	0,116095
294	-1137,93	1758,621	4,148315	4,22E-05	0,266
295	-1137,93	1965,517	4,057566	4,03E-05	0,266
296	-1137,93	2172,414	3,902504	3,76E-05	0,266
297	-1137,93	2379,31	3,738258	3,49E-05	0,266
298	-1137,93	2586,207	3,551928	3,20E-05	0,266
299	-1137,93	2793,103	3,320198	2,87E-05	0,266
300	-1137,93	3000	3,007555	2,42E-05	0,266
301	-931,034	-3000	5,603228	6,71E-05	0,001
302	-931,034	-2793,1	5,603228	6,13E-05	0,001
303	-931,034	-2586,21	5,603228	5,75E-05	0,001
304	-931,034	-2379,31	5,584221	5,59E-05	0,001
305	-931,034	-2172,41	5,563474	5,58E-05	0,001
306	-931,034	-1965,52	5,603228	5,53E-05	0,001
307	-931,034	-1758,62	5,603228	5,46E-05	0,001
308	-931,034	-1551,72	5,603228	5,41E-05	0,001
309	-931,034	-1344,83	5,279958	5,38E-05	0,001
310	-931,034	-1137,93	4,973749	5,29E-05	0,001
311	-931,034	-931,034	4,766266	5,15E-05	0,001
312	-931,034	-724,138	4,71465	5,00E-05	0,001
313	-931,034	-517,241	4,662313	5,20E-05	0,001
314	-931,034	-310,345	4,593945	5,41E-05	0,001
315	-931,034	-103,448	4,553706	5,64E-05	0,001
316	-931,034	103,4483	4,355268	5,65E-05	0,001
317	-931,034	310,3448	4,045389	5,49E-05	0,044523
318	-931,034	517,2414	3,810826	5,40E-05	0,079717

Nomor	Error	$\Delta Error$	Kp	Ki	Kd
319	-931,034	724,1379	3,674943	5,22E-05	0,098669
320	-931,034	931,0345	3,761663	4,99E-05	0,085308
321	-931,034	1137,931	3,776379	4,70E-05	0,085308
322	-931,034	1344,828	3,785191	4,31E-05	0,085308
323	-931,034	1551,724	3,787073	3,92E-05	0,148211
324	-931,034	1758,621	3,781583	3,89E-05	0,266
325	-931,034	1965,517	3,769624	3,82E-05	0,266
326	-931,034	2172,414	3,691991	3,64E-05	0,266
327	-931,034	2379,31	3,541085	3,38E-05	0,266
328	-931,034	2586,207	3,359668	3,13E-05	0,266
329	-931,034	2793,103	3,118073	2,79E-05	0,266
330	-931,034	3000	2,796013	2,31E-05	0,266
331	-724,138	-3000	5,460817	6,33E-05	0,001
332	-724,138	-2793,1	5,460817	5,83E-05	0,001
333	-724,138	-2586,21	5,460817	5,52E-05	0,001
334	-724,138	-2379,31	5,460817	5,35E-05	0,001
335	-724,138	-2172,41	5,460817	5,23E-05	0,001
336	-724,138	-1965,52	5,460817	5,11E-05	0,001
337	-724,138	-1758,62	5,460817	5,00E-05	0,001
338	-724,138	-1551,72	5,460817	4,95E-05	0,001
339	-724,138	-1344,83	5,176171	4,92E-05	0,001
340	-724,138	-1137,93	4,902417	4,84E-05	0,001
341	-724,138	-931,034	4,71465	4,71E-05	0,001
342	-724,138	-724,138	4,570197	4,59E-05	0,001
343	-724,138	-517,241	4,475733	4,76E-05	0,001
344	-724,138	-310,345	4,402165	4,94E-05	0,001
345	-724,138	-103,448	4,359068	5,12E-05	0,001
346	-724,138	103,4483	4,172424	5,13E-05	0,001
347	-724,138	310,3448	3,88296	5,02E-05	0,058561

Nomor	Error	$\Delta Error$	Kp	Ki	Kd
348	-724,138	517,2414	3,66459	4,97E-05	0,09335
349	-724,138	724,1379	3,5	4,95E-05	0,109142
350	-724,138	931,0345	3,463282	4,76E-05	0,115825
351	-724,138	1137,931	3,461256	4,44E-05	0,115825
352	-724,138	1344,828	3,460044	4,00E-05	0,115825
353	-724,138	1551,724	3,459786	3,58E-05	0,171768
354	-724,138	1758,621	3,46054	3,55E-05	0,266
355	-724,138	1965,517	3,462185	3,49E-05	0,266
356	-724,138	2172,414	3,464512	3,42E-05	0,266
357	-724,138	2379,31	3,387277	3,30E-05	0,266
358	-724,138	2586,207	3,194419	3,05E-05	0,266
359	-724,138	2793,103	2,938934	2,69E-05	0,266
360	-724,138	3000	2,600854	2,15E-05	0,266
361	-517,241	-3000	5,360351	5,99E-05	0,001
362	-517,241	-2793,1	5,360351	5,54E-05	0,001
363	-517,241	-2586,21	5,360351	5,27E-05	0,001
364	-517,241	-2379,31	5,3668	5,07E-05	0,001
365	-517,241	-2172,41	5,3708	4,86E-05	0,001
366	-517,241	-1965,52	5,360351	4,68E-05	0,001
367	-517,241	-1758,62	5,360351	4,54E-05	0,001
368	-517,241	-1551,72	5,360351	4,47E-05	0,001
369	-517,241	-1344,83	5,100274	4,44E-05	0,001
370	-517,241	-1137,93	4,847805	4,37E-05	0,001
371	-517,241	-931,034	4,662313	4,28E-05	0,001
372	-517,241	-724,138	4,475733	4,26E-05	0,001
373	-517,241	-517,241	4,290795	4,25E-05	0,001
374	-517,241	-310,345	4,209769	4,39E-05	0,001
375	-517,241	-103,448	4,162427	4,51E-05	0,001
376	-517,241	103,4483	3,982195	4,52E-05	0,001

Nomor	Error	$\Delta Error$	Kp	Ki	Kd
377	-517,241	310,3448	3,706188	4,47E-05	0,040647
378	-517,241	517,2414	3,5	4,47E-05	0,07593
379	-517,241	724,1379	3,33541	4,65E-05	0,109142
380	-517,241	931,0345	3,189174	4,51E-05	0,132676
381	-517,241	1137,931	3,140188	4,18E-05	0,137353
382	-517,241	1344,828	3,128566	3,67E-05	0,137353
383	-517,241	1551,724	3,126083	3,17E-05	0,188876
384	-517,241	1758,621	3,133325	3,16E-05	0,266
385	-517,241	1965,517	3,149089	3,12E-05	0,266
386	-517,241	2172,414	3,231448	3,21E-05	0,266
387	-517,241	2379,31	3,202535	3,17E-05	0,266
388	-517,241	2586,207	3,042774	2,95E-05	0,266
389	-517,241	2793,103	2,76744	2,54E-05	0,266
390	-517,241	3000	2,403424	1,93E-05	0,266
391	-310,345	-3000	5,293116	5,64E-05	0,001
392	-310,345	-2793,1	5,293116	5,23E-05	0,001
393	-310,345	-2586,21	5,294625	4,94E-05	0,001
394	-310,345	-2379,31	5,299606	4,67E-05	0,001
395	-310,345	-2172,41	5,301389	4,43E-05	0,001
396	-310,345	-1965,52	5,295602	4,21E-05	0,001
397	-310,345	-1758,62	5,293116	4,00E-05	0,001
398	-310,345	-1551,72	5,293116	3,90E-05	0,001
399	-310,345	-1344,83	5,047912	3,87E-05	0,001
400	-310,345	-1137,93	4,803058	3,82E-05	0,001
401	-310,345	-931,034	4,593945	3,78E-05	0,001
402	-310,345	-724,138	4,402165	3,74E-05	0,001
403	-310,345	-517,241	4,209769	3,70E-05	0,001
404	-310,345	-310,345	3,998279	3,65E-05	0,001
405	-310,345	-103,448	3,9445	3,69E-05	0,001

Nomor	Error	$\Delta Error$	Kp	Ki	Kd
406	-310,345	103,4483	3,766749	3,70E-05	0,001
407	-310,345	310,3448	3,5	3,75E-05	0,028667
408	-310,345	517,2414	3,293812	3,89E-05	0,07593
409	-310,345	724,1379	3,11704	4,10E-05	0,109142
410	-310,345	931,0345	2,954611	3,93E-05	0,132676
411	-310,345	1137,931	2,793276	3,78E-05	0,148816
412	-310,345	1344,828	2,733753	3,26E-05	0,151761
413	-310,345	1551,724	2,728155	2,62E-05	0,200622
414	-310,345	1758,621	2,744464	2,62E-05	0,266
415	-310,345	1965,517	2,792347	2,69E-05	0,266
416	-310,345	2172,414	2,882269	2,84E-05	0,266
417	-310,345	2379,31	2,855263	2,80E-05	0,266
418	-310,345	2586,207	2,776482	2,66E-05	0,266
419	-310,345	2793,103	2,588769	2,35E-05	0,266
420	-310,345	3000	2,184285	1,62E-05	0,266
421	-103,448	-3000	5,256782	5,24E-05	0,001
422	-103,448	-2793,1	5,256881	4,81E-05	0,001
423	-103,448	-2586,21	5,257302	4,48E-05	0,001
424	-103,448	-2379,31	5,258139	4,19E-05	0,001
425	-103,448	-2172,41	5,258439	3,93E-05	0,001
426	-103,448	-1965,52	5,257466	3,66E-05	0,001
427	-103,448	-1758,62	5,256956	3,37E-05	0,001
428	-103,448	-1551,72	5,256782	3,10E-05	0,001
429	-103,448	-1344,83	5,017327	3,07E-05	0,001
430	-103,448	-1137,93	4,764887	3,03E-05	0,001
431	-103,448	-931,034	4,553706	2,96E-05	0,001
432	-103,448	-724,138	4,359068	2,86E-05	0,001
433	-103,448	-517,241	4,162427	2,73E-05	0,001
434	-103,448	-310,345	3,9445	2,55E-05	0,001

Nomor	Error	$\Delta Error$	Kp	Ki	Kd
435	-103,448	-103,448	3,678143	2,32E-05	0,001
436	-103,448	103,4483	3,5	2,34E-05	0,001
437	-103,448	310,3448	3,233251	2,40E-05	0,028667
438	-103,448	517,2414	3,017805	2,53E-05	0,07593
439	-103,448	724,1379	2,827576	2,74E-05	0,109142
440	-103,448	931,0345	2,644732	2,58E-05	0,132676
441	-103,448	1137,931	2,452761	2,43E-05	0,148816
442	-103,448	1344,828	2,23146	2,35E-05	0,158201
443	-103,448	1551,724	2,163943	1,67E-05	0,207171
444	-103,448	1758,621	2,177739	1,71E-05	0,266
445	-103,448	1965,517	2,20507	1,79E-05	0,266
446	-103,448	2172,414	2,25589	1,92E-05	0,266
447	-103,448	2379,31	2,24038	1,89E-05	0,266
448	-103,448	2586,207	2,196344	1,77E-05	0,266
449	-103,448	2793,103	2,173667	1,69E-05	0,266
450	-103,448	3000	1,915988	1,14E-05	0,266
451	103,4483	-3000	5,084012	5,00E-05	0,001
452	103,4483	-2793,1	4,826333	4,56E-05	0,001
453	103,4483	-2586,21	4,803656	4,22E-05	0,001
454	103,4483	-2379,31	4,75962	3,92E-05	0,001
455	103,4483	-2172,41	4,74411	3,65E-05	0,001
456	103,4483	-1965,52	4,79493	3,36E-05	0,001
457	103,4483	-1758,62	4,822261	3,03E-05	0,001
458	103,4483	-1551,72	4,836057	2,74E-05	0,001
459	103,4483	-1344,83	4,76854	2,72E-05	0,001
460	103,4483	-1137,93	4,547239	2,67E-05	0,001
461	103,4483	-931,034	4,355268	2,58E-05	0,001
462	103,4483	-724,138	4,172424	2,45E-05	0,001
463	103,4483	-517,241	3,982195	2,27E-05	0,001

Nomor	Error	$\Delta Error$	Kp	Ki	Kd
464	103,4483	-310,345	3,766749	2,02E-05	0,001
465	103,4483	-103,448	3,5	1,67E-05	0,001
466	103,4483	103,4483	3,334012	1,14E-05	0,133799
467	103,4483	310,3448	3,065715	1,18E-05	0,169205
468	103,4483	517,2414	2,846576	1,25E-05	0,195077
469	103,4483	724,1379	2,649146	1,34E-05	0,214683
470	103,4483	931,0345	2,453987	1,27E-05	0,22947
471	103,4483	1137,931	2,242445	1,19E-05	0,240163
472	103,4483	1344,828	1,989709	1,15E-05	0,246757
473	103,4483	1551,724	1,75	8,06E-06	0,248786
474	103,4483	1758,621	1,75	8,25E-06	0,266
475	103,4483	1965,517	1,75	8,67E-06	0,266
476	103,4483	2172,414	1,75	9,22E-06	0,266
477	103,4483	2379,31	1,75	9,08E-06	0,266
478	103,4483	2586,207	1,75	8,55E-06	0,266
479	103,4483	2793,103	1,75	8,18E-06	0,266
480	103,4483	3000	1,75	8,06E-06	0,266
481	310,3448	-3000	4,815715	5,00E-05	0,028667
482	310,3448	-2793,1	4,411231	4,55E-05	0,028667
483	310,3448	-2586,21	4,223518	4,22E-05	0,033958
484	310,3448	-2379,31	4,144737	3,92E-05	0,048781
485	310,3448	-2172,41	4,117731	3,65E-05	0,053449
486	310,3448	-1965,52	4,207653	3,36E-05	0,03713
487	310,3448	-1758,62	4,255536	3,12E-05	0,028667
488	310,3448	-1551,72	4,271845	3,12E-05	0,028667
489	310,3448	-1344,83	4,266247	3,10E-05	0,028667
490	310,3448	-1137,93	4,206724	3,04E-05	0,03113
491	310,3448	-931,034	4,045389	2,98E-05	0,044523
492	310,3448	-724,138	3,88296	2,89E-05	0,058561

Nomor	Error	$\Delta Error$	Kp	Ki	Kd
493	310,3448	-517,241	3,706188	2,77E-05	0,040647
494	310,3448	-310,345	3,5	2,61E-05	0,028667
495	310,3448	-103,448	3,233251	2,02E-05	0,028667
496	310,3448	103,4483	3,065715	1,62E-05	0,169205
497	310,3448	310,3448	3,065715	1,62E-05	0,266
498	310,3448	517,2414	2,846576	1,70E-05	0,266
499	310,3448	724,1379	2,649146	1,82E-05	0,266
500	310,3448	931,0345	2,453987	1,72E-05	0,266
501	310,3448	1137,931	2,242445	1,63E-05	0,266
502	310,3448	1344,828	1,99693	1,32E-05	0,266
503	310,3448	1551,724	1,75	8,34E-06	0,266
504	310,3448	1758,621	1,75	8,34E-06	0,266
505	310,3448	1965,517	1,75	8,67E-06	0,266
506	310,3448	2172,414	1,75	9,22E-06	0,266
507	310,3448	2379,31	1,75	9,08E-06	0,266
508	310,3448	2586,207	1,75	8,55E-06	0,266
509	310,3448	2793,103	1,75	8,34E-06	0,266
510	310,3448	3000	1,75	8,34E-06	0,266
511	517,2414	-3000	4,596576	5,00E-05	0,07593
512	517,2414	-2793,1	4,23256	4,52E-05	0,07593
513	517,2414	-2586,21	3,957226	4,19E-05	0,07593
514	517,2414	-2379,31	3,797465	3,92E-05	0,083869
515	517,2414	-2172,41	3,768552	3,65E-05	0,088404
516	517,2414	-1965,52	3,850911	3,43E-05	0,07593
517	517,2414	-1758,62	3,866675	3,43E-05	0,07593
518	517,2414	-1551,72	3,873917	3,43E-05	0,07593
519	517,2414	-1344,83	3,871434	3,41E-05	0,07593
520	517,2414	-1137,93	3,859812	3,35E-05	0,07593
521	517,2414	-931,034	3,810826	3,26E-05	0,079717

Nomor	Error	$\Delta Error$	Kp	Ki	Kd
522	517,2414	-724,138	3,66459	3,19E-05	0,09335
523	517,2414	-517,241	3,5	3,10E-05	0,07593
524	517,2414	-310,345	3,293812	2,77E-05	0,07593
525	517,2414	-103,448	3,017805	2,27E-05	0,07593
526	517,2414	103,4483	2,846576	1,93E-05	0,195077
527	517,2414	310,3448	2,846576	1,93E-05	0,266
528	517,2414	517,2414	2,846576	1,93E-05	0,266
529	517,2414	724,1379	2,649146	2,05E-05	0,266
530	517,2414	931,0345	2,453987	1,96E-05	0,266
531	517,2414	1137,931	2,269201	1,77E-05	0,266
532	517,2414	1344,828	2,016061	1,39E-05	0,266
533	517,2414	1551,724	1,75	8,80E-06	0,266
534	517,2414	1758,621	1,75	8,80E-06	0,266
535	517,2414	1965,517	1,75	8,80E-06	0,266
536	517,2414	2172,414	1,75	9,22E-06	0,266
537	517,2414	2379,31	1,75	9,08E-06	0,266
538	517,2414	2586,207	1,75	8,80E-06	0,266
539	517,2414	2793,103	1,75	8,80E-06	0,266
540	517,2414	3000	1,75	8,80E-06	0,266
541	724,1379	-3000	4,399146	5,00E-05	0,109142
542	724,1379	-2793,1	4,061066	4,46E-05	0,109142
543	724,1379	-2586,21	3,805581	4,10E-05	0,109142
544	724,1379	-2379,31	3,612723	3,87E-05	0,109142
545	724,1379	-2172,41	3,535488	3,72E-05	0,109142
546	724,1379	-1965,52	3,537815	3,72E-05	0,109142
547	724,1379	-1758,62	3,53946	3,72E-05	0,109142
548	724,1379	-1551,72	3,540214	3,72E-05	0,109142
549	724,1379	-1344,83	3,539956	3,69E-05	0,109142
550	724,1379	-1137,93	3,538744	3,62E-05	0,109142

Nomor	Error	$\Delta Error$	Kp	Ki	Kd
551	724,1379	-931,034	3,536718	3,51E-05	0,109142
552	724,1379	-724,138	3,5	3,39E-05	0,109142
553	724,1379	-517,241	3,33541	3,19E-05	0,109142
554	724,1379	-310,345	3,11704	2,89E-05	0,109142
555	724,1379	-103,448	2,827576	2,45E-05	0,109142
556	724,1379	103,4483	2,649146	2,15E-05	0,214683
557	724,1379	310,3448	2,649146	2,15E-05	0,266
558	724,1379	517,2414	2,649146	2,15E-05	0,266
559	724,1379	724,1379	2,649146	2,15E-05	0,266
560	724,1379	931,0345	2,50858	2,08E-05	0,266
561	724,1379	1137,931	2,327843	1,89E-05	0,266
562	724,1379	1344,828	2,050875	1,50E-05	0,266
563	724,1379	1551,724	1,75	9,38E-06	0,266
564	724,1379	1758,621	1,75	9,38E-06	0,266
565	724,1379	1965,517	1,75	9,38E-06	0,266
566	724,1379	2172,414	1,75	9,38E-06	0,266
567	724,1379	2379,31	1,75	9,38E-06	0,266
568	724,1379	2586,207	1,75	9,38E-06	0,266
569	724,1379	2793,103	1,75	9,38E-06	0,266
570	724,1379	3000	1,75	9,38E-06	0,266
571	931,0345	-3000	4,203987	5,00E-05	0,132676
572	931,0345	-2793,1	3,881927	4,50E-05	0,132676
573	931,0345	-2586,21	3,640332	4,17E-05	0,132676
574	931,0345	-2379,31	3,458915	3,97E-05	0,131825
575	931,0345	-2172,41	3,308009	3,95E-05	0,130841
576	931,0345	-1965,52	3,230376	3,99E-05	0,132676
577	931,0345	-1758,62	3,218417	3,99E-05	0,132676
578	931,0345	-1551,72	3,212927	3,99E-05	0,132676
579	931,0345	-1344,83	3,214809	3,97E-05	0,132676

Nomor	Error	$\Delta Error$	Kp	Ki	Kd
580	931,0345	-1137,93	3,223621	3,89E-05	0,132676
581	931,0345	-931,034	3,238337	3,77E-05	0,132676
582	931,0345	-724,138	3,325057	3,51E-05	0,129703
583	931,0345	-517,241	3,189174	3,26E-05	0,132676
584	931,0345	-310,345	2,954611	2,98E-05	0,132676
585	931,0345	-103,448	2,644732	2,58E-05	0,132676
586	931,0345	103,4483	2,453987	2,31E-05	0,22947
587	931,0345	310,3448	2,453987	2,31E-05	0,266
588	931,0345	517,2414	2,453987	2,31E-05	0,266
589	931,0345	724,1379	2,50858	2,20E-05	0,266
590	931,0345	931,0345	2,453987	2,00E-05	0,266
591	931,0345	1137,931	2,281028	1,80E-05	0,266
592	931,0345	1344,828	2,022994	1,41E-05	0,266
593	931,0345	1551,724	1,75	8,93E-06	0,266
594	931,0345	1758,621	1,75	8,93E-06	0,266
595	931,0345	1965,517	1,75	8,93E-06	0,266
596	931,0345	2172,414	1,75	9,22E-06	0,266
597	931,0345	2379,31	1,75	9,08E-06	0,266
598	931,0345	2586,207	1,75	8,93E-06	0,266
599	931,0345	2793,103	1,75	8,93E-06	0,266
600	931,0345	3000	1,75	8,93E-06	0,266
601	1137,931	-3000	3,992445	5,00E-05	0,148816
602	1137,931	-2793,1	3,679802	4,54E-05	0,148816
603	1137,931	-2586,21	3,448072	4,29E-05	0,148588
604	1137,931	-2379,31	3,261742	4,22E-05	0,147216
605	1137,931	-2172,41	3,097496	4,20E-05	0,146725
606	1137,931	-1965,52	2,942434	4,27E-05	0,148318
607	1137,931	-1758,62	2,851685	4,30E-05	0,148816
608	1137,931	-1551,72	2,838084	4,30E-05	0,148816

Nomor	Error	$\Delta Error$	Kp	Ki	Kd
609	1137,931	-1344,83	2,842751	4,27E-05	0,148816
610	1137,931	-1137,93	2,864542	4,18E-05	0,148816
611	1137,931	-931,034	2,936119	3,89E-05	0,147639
612	1137,931	-724,138	3,020487	3,62E-05	0,146156
613	1137,931	-517,241	2,914377	3,35E-05	0,148004
614	1137,931	-310,345	2,793276	3,04E-05	0,148816
615	1137,931	-103,448	2,452761	2,67E-05	0,148816
616	1137,931	103,4483	2,242445	2,42E-05	0,240163
617	1137,931	310,3448	2,242445	2,42E-05	0,266
618	1137,931	517,2414	2,269201	2,34E-05	0,266
619	1137,931	724,1379	2,327843	2,20E-05	0,266
620	1137,931	931,0345	2,281028	2,00E-05	0,266
621	1137,931	1137,931	2,242445	1,71E-05	0,266
622	1137,931	1344,828	2,000541	1,33E-05	0,266
623	1137,931	1551,724	1,75	8,44E-06	0,266
624	1137,931	1758,621	1,75	8,44E-06	0,266
625	1137,931	1965,517	1,75	8,67E-06	0,266
626	1137,931	2172,414	1,75	9,22E-06	0,266
627	1137,931	2379,31	1,75	9,08E-06	0,266
628	1137,931	2586,207	1,75	8,55E-06	0,266
629	1137,931	2793,103	1,75	8,44E-06	0,266
630	1137,931	3000	1,75	8,44E-06	0,266
631	1344,828	-3000	3,739709	5,00E-05	0,158201
632	1344,828	-2793,1	3,43189	4,65E-05	0,158178
633	1344,828	-2586,21	3,196429	4,64E-05	0,158006
634	1344,828	-2379,31	2,998965	4,60E-05	0,157664
635	1344,828	-2172,41	2,818888	4,59E-05	0,157541
636	1344,828	-1965,52	2,64054	4,63E-05	0,157939
637	1344,828	-1758,62	2,447675	4,65E-05	0,158147

Nomor	Error	$\Delta Error$	Kp	Ki	Kd
638	1344,828	-1551,72	2,329833	4,66E-05	0,158201
639	1344,828	-1344,83	2,339335	4,63E-05	0,158201
640	1344,828	-1137,93	2,363568	4,27E-05	0,158062
641	1344,828	-931,034	2,413201	3,97E-05	0,15777
642	1344,828	-724,138	2,473738	3,69E-05	0,157399
643	1344,828	-517,241	2,397961	3,41E-05	0,15786
644	1344,828	-310,345	2,355511	3,10E-05	0,158109
645	1344,828	-103,448	2,23146	2,72E-05	0,158201
646	1344,828	103,4483	1,989709	2,48E-05	0,246757
647	1344,828	310,3448	1,99693	2,44E-05	0,266
648	1344,828	517,2414	2,016061	2,34E-05	0,266
649	1344,828	724,1379	2,050875	2,20E-05	0,266
650	1344,828	931,0345	2,022994	2,00E-05	0,266
651	1344,828	1137,931	2,000541	1,71E-05	0,266
652	1344,828	1344,828	1,989709	1,28E-05	0,266
653	1344,828	1551,724	1,75	8,11E-06	0,266
654	1344,828	1758,621	1,75	8,25E-06	0,266
655	1344,828	1965,517	1,75	8,67E-06	0,266
656	1344,828	2172,414	1,75	9,22E-06	0,266
657	1344,828	2379,31	1,75	9,08E-06	0,266
658	1344,828	2586,207	1,75	8,55E-06	0,266
659	1344,828	2793,103	1,75	8,18E-06	0,25503
660	1344,828	3000	1,75	8,11E-06	0,185067
661	1551,724	-3000	3,413551	4,88E-05	0,160483
662	1551,724	-2793,1	3,191486	4,87E-05	0,160473
663	1551,724	-2586,21	2,951973	4,86E-05	0,160441
664	1551,724	-2379,31	2,746447	4,84E-05	0,160377
665	1551,724	-2172,41	2,552416	4,84E-05	0,160354
666	1551,724	-1965,52	2,35155	4,86E-05	0,160428

Nomor	Error	$\Delta Error$	Kp	Ki	Kd
667	1551,724	-1758,62	2,123159	4,87E-05	0,160467
668	1551,724	-1551,72	1,836449	4,87E-05	0,160483
669	1551,724	-1344,83	1,747563	4,65E-05	0,160478
670	1551,724	-1137,93	1,74744	4,29E-05	0,160452
671	1551,724	-931,034	1,747184	3,99E-05	0,160397
672	1551,724	-724,138	1,746858	3,71E-05	0,160327
673	1551,724	-517,241	1,747264	3,43E-05	0,160414
674	1551,724	-310,345	1,747481	3,12E-05	0,16046
675	1551,724	-103,448	1,747577	2,73E-05	0,160481
676	1551,724	103,4483	1,747577	2,49E-05	0,248786
677	1551,724	310,3448	1,747481	2,44E-05	0,266
678	1551,724	517,2414	1,747264	2,34E-05	0,266
679	1551,724	724,1379	1,746858	2,20E-05	0,266
680	1551,724	931,0345	1,747184	2,00E-05	0,266
681	1551,724	1137,931	1,74744	1,71E-05	0,266
682	1551,724	1344,828	1,747563	1,28E-05	0,266
683	1551,724	1551,724	1,747586	8,02E-06	0,266
684	1551,724	1758,621	1,747515	8,25E-06	0,266
685	1551,724	1965,517	1,747332	8,67E-06	0,266
686	1551,724	2172,414	1,746983	9,22E-06	0,266
687	1551,724	2379,31	1,747091	9,08E-06	0,266
688	1551,724	2586,207	1,747391	8,55E-06	0,266
689	1551,724	2793,103	1,747542	8,18E-06	0,249237
690	1551,724	3000	1,747586	8,02E-06	0,022153
691	1758,621	-3000	3,126841	4,47E-05	0,154306
692	1758,621	-2793,1	3,126841	4,42E-05	0,154306
693	1758,621	-2586,21	2,951973	4,37E-05	0,153978
694	1758,621	-2379,31	2,746447	4,31E-05	0,153187
695	1758,621	-2172,41	2,552416	4,29E-05	0,152904

Nomor	Error	$\Delta Error$	Kp	Ki	Kd
696	1758,621	-1965,52	2,35155	4,36E-05	0,153823
697	1758,621	-1758,62	2,123159	4,40E-05	0,154306
698	1758,621	-1551,72	1,838918	4,45E-05	0,154306
699	1758,621	-1344,83	1,736686	4,43E-05	0,154306
700	1758,621	-1137,93	1,717842	4,23E-05	0,154109
701	1758,621	-931,034	1,71468	3,94E-05	0,153431
702	1758,621	-724,138	1,710682	3,66E-05	0,152575
703	1758,621	-517,241	1,715661	3,38E-05	0,153642
704	1758,621	-310,345	1,718346	3,07E-05	0,154217
705	1758,621	-103,448	1,718761	2,70E-05	0,154306
706	1758,621	103,4483	1,718761	2,46E-05	0,243964
707	1758,621	310,3448	1,718346	2,44E-05	0,266
708	1758,621	517,2414	1,715661	2,34E-05	0,266
709	1758,621	724,1379	1,710682	2,20E-05	0,266
710	1758,621	931,0345	1,71468	2,00E-05	0,266
711	1758,621	1137,931	1,717842	1,71E-05	0,266
712	1758,621	1344,828	1,718761	1,30E-05	0,266
713	1758,621	1551,724	1,718761	8,25E-06	0,266
714	1758,621	1758,621	1,718761	8,25E-06	0,266
715	1758,621	1965,517	1,716506	8,67E-06	0,266
716	1758,621	2172,414	1,712219	9,22E-06	0,266
717	1758,621	2379,31	1,713541	9,08E-06	0,266
718	1758,621	2586,207	1,71723	8,55E-06	0,266
719	1758,621	2793,103	1,718761	8,25E-06	0,266
720	1758,621	3000	1,718761	8,25E-06	0,266
721	1965,517	-3000	2,89845	4,14E-05	0,141596
722	1965,517	-2793,1	2,89845	4,10E-05	0,141596
723	1965,517	-2586,21	2,89845	4,00E-05	0,141596
724	1965,517	-2379,31	2,746447	3,91E-05	0,139948

Nomor	Error	$\Delta Error$	Kp	Ki	Kd
725	1965,517	-2172,41	2,552416	3,88E-05	0,139217
726	1965,517	-1965,52	2,35155	3,97E-05	0,141596
727	1965,517	-1758,62	2,146238	4,05E-05	0,141596
728	1965,517	-1551,72	1,845226	4,09E-05	0,141596
729	1965,517	-1344,83	1,735713	4,08E-05	0,141596
730	1965,517	-1137,93	1,690819	4,02E-05	0,141596
731	1965,517	-931,034	1,654704	3,84E-05	0,140579
732	1965,517	-724,138	1,644391	3,57E-05	0,13837
733	1965,517	-517,241	1,65725	3,30E-05	0,141125
734	1965,517	-310,345	1,659446	3,01E-05	0,141596
735	1965,517	-103,448	1,659446	2,63E-05	0,141596
736	1965,517	103,4483	1,659446	2,37E-05	0,23531
737	1965,517	310,3448	1,659446	2,37E-05	0,266
738	1965,517	517,2414	1,65725	2,34E-05	0,266
739	1965,517	724,1379	1,644391	2,20E-05	0,266
740	1965,517	931,0345	1,654704	2,00E-05	0,266
741	1965,517	1137,931	1,659446	1,75E-05	0,266
742	1965,517	1344,828	1,659446	1,37E-05	0,266
743	1965,517	1551,724	1,659446	8,67E-06	0,266
744	1965,517	1758,621	1,659446	8,67E-06	0,266
745	1965,517	1965,517	1,659446	8,67E-06	0,266
746	1965,517	2172,414	1,648345	9,22E-06	0,266
747	1965,517	2379,31	1,651756	9,08E-06	0,266
748	1965,517	2586,207	1,659446	8,67E-06	0,266
749	1965,517	2793,103	1,659446	8,67E-06	0,266
750	1965,517	3000	1,659446	8,67E-06	0,266
751	2172,414	-3000	2,697584	3,85E-05	0,121938
752	2172,414	-2793,1	2,697584	3,82E-05	0,121938
753	2172,414	-2586,21	2,697584	3,73E-05	0,121938

Nomor	Error	$\Delta Error$	Kp	Ki	Kd
754	2172,414	-2379,31	2,697584	3,61E-05	0,121938
755	2172,414	-2172,41	2,552416	3,57E-05	0,121938
756	2172,414	-1965,52	2,408285	3,66E-05	0,121938
757	2172,414	-1758,62	2,188917	3,72E-05	0,121938
758	2172,414	-1551,72	1,857181	3,75E-05	0,121938
759	2172,414	-1344,83	1,73386	3,74E-05	0,121938
760	2172,414	-1137,93	1,683385	3,70E-05	0,121938
761	2172,414	-931,034	1,609257	3,62E-05	0,121938
762	2172,414	-724,138	1,561068	3,44E-05	0,120515
763	2172,414	-517,241	1,567713	3,22E-05	0,121938
764	2172,414	-310,345	1,567713	2,94E-05	0,121938
765	2172,414	-103,448	1,567713	2,52E-05	0,121938
766	2172,414	103,4483	1,567713	2,24E-05	0,22262
767	2172,414	310,3448	1,567713	2,24E-05	0,266
768	2172,414	517,2414	1,567713	2,24E-05	0,266
769	2172,414	724,1379	1,561068	2,20E-05	0,266
770	2172,414	931,0345	1,567713	2,05E-05	0,266
771	2172,414	1137,931	1,567713	1,86E-05	0,266
772	2172,414	1344,828	1,567713	1,46E-05	0,266
773	2172,414	1551,724	1,567713	9,22E-06	0,266
774	2172,414	1758,621	1,567713	9,22E-06	0,266
775	2172,414	1965,517	1,567713	9,22E-06	0,266
776	2172,414	2172,414	1,567713	9,22E-06	0,266
777	2172,414	2379,31	1,567713	9,22E-06	0,266
778	2172,414	2586,207	1,567713	9,22E-06	0,266
779	2172,414	2793,103	1,567713	9,22E-06	0,266
780	2172,414	3000	1,567713	9,22E-06	0,266
781	2379,31	-3000	2,503553	3,58E-05	0,093924
782	2379,31	-2793,1	2,503553	3,54E-05	0,093924

Nomor	Error	$\Delta Error$	Kp	Ki	Kd
783	2379,31	-2586,21	2,503553	3,46E-05	0,093924
784	2379,31	-2379,31	2,503553	3,35E-05	0,093924
785	2379,31	-2172,41	2,521965	3,28E-05	0,098269
786	2379,31	-1965,52	2,391158	3,32E-05	0,093924
787	2379,31	-1758,62	2,175923	3,36E-05	0,093924
788	2379,31	-1551,72	1,853501	3,39E-05	0,093924
789	2379,31	-1344,83	1,734432	3,38E-05	0,093924
790	2379,31	-1137,93	1,685674	3,34E-05	0,093924
791	2379,31	-931,034	1,613849	3,28E-05	0,093924
792	2379,31	-724,138	1,507994	3,34E-05	0,102996
793	2379,31	-517,241	1,436978	3,15E-05	0,093924
794	2379,31	-310,345	1,436978	2,83E-05	0,093924
795	2379,31	-103,448	1,436978	2,36E-05	0,093924
796	2379,31	103,4483	1,436978	2,05E-05	0,205537
797	2379,31	310,3448	1,436978	2,05E-05	0,266
798	2379,31	517,2414	1,436978	2,05E-05	0,266
799	2379,31	724,1379	1,479316	2,11E-05	0,266
800	2379,31	931,0345	1,436978	2,02E-05	0,266
801	2379,31	1137,931	1,436978	1,83E-05	0,266
802	2379,31	1344,828	1,436978	1,44E-05	0,266
803	2379,31	1551,724	1,436978	9,08E-06	0,266
804	2379,31	1758,621	1,436978	9,08E-06	0,266
805	2379,31	1965,517	1,436978	9,08E-06	0,266
806	2379,31	2172,414	1,457255	9,22E-06	0,266
807	2379,31	2379,31	1,436978	9,08E-06	0,266
808	2379,31	2586,207	1,436978	9,08E-06	0,266
809	2379,31	2793,103	1,436978	9,08E-06	0,266
810	2379,31	3000	1,436978	9,08E-06	0,266
811	2586,207	-3000	2,298027	3,28E-05	0,054517

Nomor	Error	$\Delta Error$	Kp	Ki	Kd
812	2586,207	-2793,1	2,298027	3,25E-05	0,054517
813	2586,207	-2586,21	2,298027	3,17E-05	0,054517
814	2586,207	-2379,31	2,345341	3,11E-05	0,069361
815	2586,207	-2172,41	2,361754	3,03E-05	0,074024
816	2586,207	-1965,52	2,307488	2,92E-05	0,057696
817	2586,207	-1758,62	2,138879	2,91E-05	0,054517
818	2586,207	-1551,72	1,843203	2,93E-05	0,054517
819	2586,207	-1344,83	1,736026	2,92E-05	0,054517
820	2586,207	-1137,93	1,692077	2,90E-05	0,054517
821	2586,207	-931,034	1,617824	2,99E-05	0,065101
822	2586,207	-724,138	1,507994	3,11E-05	0,079122
823	2586,207	-517,241	1,353004	2,95E-05	0,061219
824	2586,207	-310,345	1,253079	2,70E-05	0,054517
825	2586,207	-103,448	1,253079	2,16E-05	0,054517
826	2586,207	103,4483	1,253079	1,79E-05	0,18308
827	2586,207	310,3448	1,253079	1,79E-05	0,266
828	2586,207	517,2414	1,284354	1,83E-05	0,266
829	2586,207	724,1379	1,367904	1,95E-05	0,266
830	2586,207	931,0345	1,302469	1,86E-05	0,266
831	2586,207	1137,931	1,253079	1,73E-05	0,266
832	2586,207	1344,828	1,253079	1,35E-05	0,266
833	2586,207	1551,724	1,253079	8,55E-06	0,266
834	2586,207	1758,621	1,253079	8,55E-06	0,266
835	2586,207	1965,517	1,267913	8,67E-06	0,266
836	2586,207	2172,414	1,344114	9,22E-06	0,266
837	2586,207	2379,31	1,322351	9,08E-06	0,266
838	2586,207	2586,207	1,253079	8,55E-06	0,266
839	2586,207	2793,103	1,253079	8,55E-06	0,266
840	2586,207	3000	1,253079	8,55E-06	0,266

Nomor	Error	$\Delta Error$	Kp	Ki	Kd
841	2793,103	-3000	2,058514	2,94E-05	0,001
842	2793,103	-2793,1	2,058514	2,91E-05	0,001
843	2793,103	-2586,21	2,075027	2,86E-05	0,005852
844	2793,103	-2379,31	2,107094	2,77E-05	0,019975
845	2793,103	-2172,41	2,118389	2,65E-05	0,024415
846	2793,103	-1965,52	2,081382	2,50E-05	0,008881
847	2793,103	-1758,62	2,061479	2,29E-05	0,001
848	2793,103	-1551,72	1,837985	2,22E-05	0,001
849	2793,103	-1344,83	1,736829	2,23E-05	0,001
850	2793,103	-1137,93	1,693142	2,29E-05	0,003147
851	2793,103	-931,034	1,617824	2,41E-05	0,015924
852	2793,103	-724,138	1,507994	2,54E-05	0,029281
853	2793,103	-517,241	1,353004	2,37E-05	0,012233
854	2793,103	-310,345	1,132447	2,26E-05	0,000784
855	2793,103	-103,448	0,984607	1,87E-05	0,001
856	2793,103	103,4483	0,984607	1,41E-05	0,153005
857	2793,103	310,3448	1,002325	1,43E-05	0,264932
858	2793,103	517,2414	1,055753	1,51E-05	0,266
859	2793,103	724,1379	1,135312	1,62E-05	0,266
860	2793,103	931,0345	1,072977	1,53E-05	0,266
861	2793,103	1137,931	1,01335	1,45E-05	0,266
862	2793,103	1344,828	0,984607	1,29E-05	0,266
863	2793,103	1551,724	0,984607	8,18E-06	0,266
864	2793,103	1758,621	0,992744	8,25E-06	0,266
865	2793,103	1965,517	1,040112	8,67E-06	0,266
866	2793,103	2172,414	1,112605	9,22E-06	0,266
867	2793,103	2379,31	1,091884	9,08E-06	0,266
868	2793,103	2586,207	1,025977	8,55E-06	0,266
869	2793,103	2793,103	0,984607	8,18E-06	0,266

Nomor	Error	$\Delta Error$	Kp	Ki	Kd
870	2793,103	3000	0,984607	8,18E-06	0,266
871	3000	-3000	1,75	2,50E-05	0,001
872	3000	-2793,1	1,75	2,47E-05	0,001
873	3000	-2586,21	1,75	2,40E-05	0,001
874	3000	-2379,31	1,75	2,28E-05	0,001
875	3000	-2172,41	1,75	2,11E-05	0,001
876	3000	-1965,52	1,75	1,86E-05	0,001
877	3000	-1758,62	1,75	1,52E-05	0,001
878	3000	-1551,72	1,75	9,83E-06	0,001
879	3000	-1344,83	1,736939	8,11E-06	0,001
880	3000	-1137,93	1,693142	8,44E-06	0,001
881	3000	-931,034	1,617824	8,93E-06	0,001
882	3000	-724,138	1,507994	9,38E-06	0,001
883	3000	-517,241	1,353004	8,80E-06	0,001
884	3000	-310,345	1,132447	8,34E-06	0,001
885	3000	-103,448	0,799442	8,06E-06	0,001
886	3000	103,4483	0,564093	8,06E-06	0,001
887	3000	310,3448	0,583945	8,34E-06	0,028667
888	3000	517,2414	0,615905	8,80E-06	0,07593
889	3000	724,1379	0,656648	9,38E-06	0,109142
890	3000	931,0345	0,625351	8,93E-06	0,132676
891	3000	1137,931	0,590927	8,44E-06	0,148816
892	3000	1344,828	0,567718	8,11E-06	0,158201
893	3000	1551,724	0,561489	8,02E-06	0,208542
894	3000	1758,621	0,577712	8,25E-06	0,266
895	3000	1965,517	0,606993	8,67E-06	0,266
896	3000	2172,414	0,645743	9,22E-06	0,266
897	3000	2379,31	0,635304	9,08E-06	0,266
898	3000	2586,207	0,598648	8,55E-06	0,266

Nomor	<i>Error</i>	$\Delta Error$	Kp	Ki	Kd
899	3000	2793,103	0,572282	8,18E-06	0,266
900	3000	3000	0,56	8,00E-06	0,266



BIODATA PENULIS

Penulis dilahirkan di Surabaya pada tanggal 18 Februari 1997 dan merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Penulis mengawali pendidikan formal di SD Negeri Kendangsari 1 Surabaya, kemudian melanjutkan ke SMP Negeri 6 Surabaya, SMA Negeri 5 Surabaya, dan pada tahun 2015 memasuki bangku perkuliahan di Departemen Teknik Elektro ITS. Penulis merupakan anggota asisten Lab Konversi Energi Listrik dan memiliki minat dibidang konversi energi listrik. Pada saat menjadi asisten lab penulis pernah menjabat sebagai koordinator praktikum. Penulis juga aktif dibidang karya tulis dan pernah menjadi finalis dalam lomba karya tulis wilayah jawa bali yang diadakan oleh fakultas teknik elektro universitas udayana pada tahun 2018. Selain itu Penulis juga pernah terpilih mengikuti pelatihan presentsi bisnis tingkat internasional dibidang teknologi yang diadakan oleh lembaga kerja sama jerman GIZ.

--- halaman ini sengaja dikosongkan ---